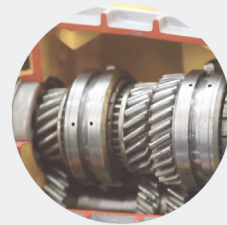




DESIGN E OTIMIZAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS METÁLICAS PARA PROCESSOS DE FABRICAÇÃO ADITIVA

JOSÉ ARMANDO ARANTES CARREIRA
dezembro de 2017



DESIGN E OTIMIZAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS METÁLICAS PARA PROCESSOS DE FABRICAÇÃO ADITIVA

JOSÉ ARMANDO ARANTES CARREIRA

Outubro de 2017

DESIGN E OTIMIZAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS METÁLICAS PARA PROCESSOS DE FABRICAÇÃO ADITIVA

José Armando Arantes Carreira

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica - Mestrado em Materiais e Tecnologias de Fabrico

DESIGN E OTIMIZAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS METÁLICAS PARA PROCESSOS DE FABRICAÇÃO ADITIVA

José Armando Arantes Carreira

1120003

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica - Mestrado em Materiais e Tecnologias de Fabrico

JÚRI

Presidente

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutora Maria de Fátima de Almeida Ferreira

Professor Adjunto Convidado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão (IPP)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente dirijo os meus agradecimentos ao orientador desta dissertação, Doutor Francisco José Gomes da Silva, pela orientação, apoio e disponibilidade prestados.

Ao coorientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, por toda a partilha de conhecimentos relativo ao MEF que permitiram a melhoria progressiva deste trabalho.

Ao Engenheiro Lucas Dourado Azevedo, agradeço pelas críticas, sugestões e estímulo demonstrados durante esta longa caminhada.

Aos meus colegas do ISEP, porque contribuíram direta e indiretamente durante todo o meu percurso académico.

Deixo também um agradecimento especial à família, pelo carinho, e por toda a força para levar a cabo esta dissertação.

Finalmente, aos meus amigos, agradeço pela compreensão, amizade e incentivo.

PALAVRAS-CHAVE

Fabricação Aditiva de Metal, Processos de Modelação, Otimização Topológica, Metalurgia do Pó.

RESUMO

Atualmente, a constante dinâmica dos mercados impulsiona a tecnologia para mudanças e evolução nos processos produtivos. Recentes melhorias nas técnicas de Fabricação Aditiva (FA) mudaram não só os materiais utilizados nestes processos, como também a qualidade das peças produzidas. A inclusão de materiais metálicos abriu novas oportunidades de aplicações para indústrias como a aeronáutica, automóvel e médica. A FA é um processo produtivo no qual um componente é produzido por consecutiva adição e compilação de camadas de material. A sua flexibilidade geométrica, associada às reduções de tempos e custos de produção, são as principais características que tornam estes processos tão procurados pelas indústrias mais exigentes.

Otimização Topológica (OT) é um tipo de otimização estrutural que calcula a distribuição ideal de material para um determinado problema. Por norma, os métodos de fabrico mais convencionais, como é o caso da maquinagem, não são capazes de produzir as geometrias complexas obtidas através de soluções de OT.

A combinação entre FA e OT está cada vez mais a ser utilizada para criação de componentes mais leves, mas simultaneamente resistentes, de modo a usufruir dos potenciais de ambas as tecnologias.

Este trabalho resume-se a todo um processo de desenvolvimento do *design* e otimização de um componente da porta de uma aeronave, para ser posteriormente produzido por FA. Foram definidas duas metodologias, uma de *design* e outra de processo produtivo, para facilitar a abordagem e resolução do problema.

KEYWORDS

Metal Additive Manufacturing, Modeling Processes, Topological Optimization, Powder Metallurgy.

ABSTRACT

Nowadays, the constant dynamics of the markets impel the technology for changes and evolution in the productive processes. Recent improvements in Additive Manufacturing (AM) techniques have changed not only the materials used in these processes, but also the quality of the parts produced. The inclusion of metallic materials has opened new application opportunities for industries such as aeronautics, automotive and medical. FA is a productive process in which a component is produced by consecutive addition and compilation of layers of material. Its geometric flexibility, coupled with reductions in production times and costs, are the key features that make these processes so sought by the most demanding industries.

Topological Optimization (TO) is a type of structural optimization that calculates the optimal distribution of material for a given problem. Normally, the conventional manufacturing methods, such as machining, are not capable of producing the complex geometries obtained from TO solutions.

The combination of AM and TO is increasingly being used to create lighter components, but simultaneously resilient, to take advantage of the potential of both technologies.

This work summarizes an entire process of *design* development and optimization of an aircraft door component to be subsequently produced by AM. Two methodologies were defined, one of *design* and one of productive process, to facilitate the approach and resolution of the problem.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
3DP	Impressão 3D
Al	Alumínio
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CNC	Comando Numérico Computorizado
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DMD	<i>Direct Metal Deposition</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DpF	<i>Design para Fabricação</i>
DpFA	<i>Design para Fabricação Aditiva</i>
EBDM	<i>Electron Beam Direct Manufacturing</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FA	Fabricação Aditiva
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FR	Fabricação Rápida
FS	Fabricação Subtrativa
IJP	<i>Inkjet Printing</i>

LAM	<i>Laser Additive Manufacturing</i>
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
ME	<i>Material Extrusion</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MJ	<i>Material Jetting</i>
OT	Otimização Topológica
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PR	Prototipagem Rápida
Ra	Rugosidade Média Aritmética da Superfície
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i>
SL	<i>Sheet Lamination</i>
SLA	<i>Stereo-Lithography Apparatus</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TO	<i>Topological Optimization</i>
Ti	Titânio
UAM	<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>
UV	Ultravioleta
VATP	<i>VAT Photopolymerization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS DE EQUAÇÕES

A	Vetor global de variáveis
A_e	Vetor de variáveis de um elemento
a_i	Valor de determinado atributo
a_{ij}	Valor de determinado atributo para determinada alternativa
$a_{j,max}$	Valor máximo de determinado atributo
$a_{j,min}$	Valor mínimo de determinado atributo
c	Calor específico
E	Módulo de elasticidade
E_m	Densidade de energia para fundir um determinado material
E_V	Densidade de energia da fonte térmica
f	Coeficiente de segurança
F	Vetor global de forças
F_e	Vetor de forças de um elemento
F_X	Força na direção X
F_Y	Força na direção Y
F_Z	Força na direção Z
G	Módulo de elasticidade ao corte
h	Espaçamento entre passagens
K	Matriz de rigidez global
K^0	Matriz de rigidez global para um certo material isotrópico
K_e	Matriz de rigidez de um elemento

l_j	Valores das importâncias (ou pesos)
M_j	Índice de mérito
p	Exponente de penalização
P	Potência da energia térmica
R	Vetor global de reações numa estrutura
r_{ij}	Valor de classificação de determinado atributo i e alternativa j
t	Espessura da camada
T_a	Temperatura ambiente
T_m	Temperatura de fusão do material
u	Vetor deslocamento
v	Velocidade de varrimento
V	Volume de material
ρ	Massa volúmica
σ_{ced}	Tensão de cedência do material
σ_{max}	Tensão máxima instalada
σ_{rot}	Tensão de rotura do material
σ_{VM}	Tensão equivalente de <i>Von Mises</i>
ν	Coeficiente de <i>Poisson</i>
ϕ	Função implícita
Ω	Domínio de material

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLO DO PRINCÍPIO BÁSICO DE PRODUÇÃO POR FA. ADAPTADO DE [18].	33
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE UMA PEÇA PRODUZIDA POR FA. ADAPTADO DE [17].	34
FIGURA 3 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TECNOLOGIA SLA. ADAPTADO DE [21].	37
FIGURA 4 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS TECNOLOGIAS: A) DMLS, SLM E SLS; B) EBM. ADAPTADO DE [21].	38
FIGURA 5 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TECNOLOGIA 3DP. ADAPTADO DE [21].	40
FIGURA 6 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TECNOLOGIA IJP. ADAPTADO DE [21].	41
FIGURA 7 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TECNOLOGIA UAM. ADAPTADO DE [21].	42
FIGURA 8 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TECNOLOGIA LOM. ADAPTADO DE [21].	43
FIGURA 9 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TECNOLOGIA FDM. ADAPTADO DE [21].	44
FIGURA 10 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS TECNOLOGIAS EBDM, DMD E LENS. ADAPTADO DE [21].	45
FIGURA 11 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE FA. ADAPTADO DE [25].	47
FIGURA 12 - INFLUÊNCIA DE EV NA DENSIDADE FINAL DA PEÇA. ADAPTADO DE [26].	48
FIGURA 13 - INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE PASSAGENS. ADAPTADO DE [26].	49
FIGURA 14 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE CADA CAMADA. ADAPTADO DE [26].	49
FIGURA 15 - EXEMPLO RESUMIDO DO PROCESSO DE OT. ADAPTADO DE [42].	53
FIGURA 16 - INFLUÊNCIA DO REFINAMENTO DA MALHA. A) 2700, B) 4800 E C) 17200 ELEMENTOS [41].	54
FIGURA 17 - APWORKS LIGHT RIDER, PROJETO DE COMBINAÇÃO ENTRE FA E OT. ADAPTADO DE [45].	55
FIGURA 18 - EXEMPLO DE CONSTRUÇÃO INTERCALADA ENTRE ESTRUTURA TRELIÇADA E MATERIAL SÓLIDO [31].	58
FIGURA 19 - EXEMPLO DE ALTERAÇÕES NO PROJETO PARA EVITAR SUPORTES. ADAPTADO DE [4].	59
FIGURA 20 - LINHAS DE ORIENTAÇÃO DE PROJETO.	65
FIGURA 21 - IMAGEM REPRESENTATIVA DA APLICAÇÃO DO COMPONENTE EM ESTUDO.	68
FIGURA 22 - COMPONENTE INICIAL.	70
FIGURA 23 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE FORÇAS E FIXAÇÕES PARA ANÁLISE FEM.	71
FIGURA 24 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA MALHA NO NÚMERO DE ELEMENTOS.	72
FIGURA 25 - INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ELEMENTOS DA MALHA NO VALOR DAS TENSÕES OBTIDAS.	74
FIGURA 26 - EXEMPLO DO RESULTADO OBTIDO DE UMA ANÁLISE MEF.	74
FIGURA 27 - OTIMIZAÇÃO PARA O CASO DE ESTUDO 1: A) CAMINHOS DE CARGAS. B) SOLUÇÃO DE OTIMIZAÇÃO.	75
FIGURA 28 - OTIMIZAÇÃO PARA O CASO DE ESTUDO 2: A) CAMINHOS DE CARGAS. B) SOLUÇÃO DE OTIMIZAÇÃO.	76
FIGURA 29 - EXEMPLO DE FORMATO ORGÂNICO OBTIDO PELA OT.	76
FIGURA 30 - EVOLUÇÃO DO DESIGN PARA O COMPONENTE A OBTIDO PELO CASO DE ESTUDO 1.	77
FIGURA 31 - EVOLUÇÃO DO DESIGN PARA O COMPONENTE B OBTIDO PELO CASO DE ESTUDO 2.	77
FIGURA 32 - RESULTADO DA ANÁLISE DO COMPONENTE A: A) CASO DE ESTUDO 1. B) CASO DE ESTUDO 2.	78

FIGURA 33 – RESULTADO DA ANÁLISE DO COMPONENTE B: A) CASO DE ESTUDO 1. B) CASO DE ESTUDO 2.	79
FIGURA 34 - EVOLUÇÃO DO DESIGN PARA O COMPONENTE A OBTIDO PELA JUNÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO 1 E 2.	80
FIGURA 35 - RESULTADO DA ANÁLISE DO COMPONENTE C: A) CASO DE ESTUDO 1. B) CASO DE ESTUDO 2.	80
FIGURA 36 - DESIGN FINAL DO COMPONENTE OTIMIZADO.	81
FIGURA 37 - INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA PEÇA NA QUANTIDADE DE SUPORTES: A) HORIZONTAL. B) VERTICAL. C) 30° DE INCLINAÇÃO.	84
FIGURA 38 - EXEMPLO DEMONSTRATIVO E COMPARATIVO ENTRE PRINCÍPIOS DE FABRICO: A) – FA; B) – FS. ADAPTADO DE [55].	85

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - RESUMO DAS TECNOLOGIAS, PROCESSOS E MATERIAIS APLICADOS À FA [6], [13], [14].....	46
TABELA 2 - AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS E RESPECTIVOS ATRIBUTOS. ADAPTADO DE [6].....	67
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO FINAL DOS PROCESSOS.....	67
TABELA 4 - PROPRIEDADE MECÂNICAS DO ALUMINO 7075-T6 [52].....	68
TABELA 5 - CASOS DE ESTUDO DAS FORÇAS APLICADAS NO COMPONENTE ORIGINAL, PARA OBTER AS TENSÕES MÁXIMAS INSTALADAS.	69
TABELA 6 - VALOR DAS TENSÕES OBTIDAS DURANTE A CONVERGÊNCIA DA MALHA DO COMPONENTE ORIGINAL REFERENTE AO CASO 1.....	73
TABELA 7 - VALOR DAS TENSÕES OBTIDAS DURANTE A CONVERGÊNCIA DA MALHA DO COMPONENTE ORIGINAL REFERENTE AO CASO 2.....	73
TABELA 8 - PROPRIEDADE MECÂNICAS DO TITÂNIO ASTM B817 TIPO I GRAU 2 [53].	81
TABELA 9 - PROPRIEDADE MECÂNICAS DO AÇO AISI 1060 [54].....	82
TABELA 10 - COMPARAÇÃO DAS TENSÕES PARA OS DIFERENTES COMPONENTES E MATERIAIS.	82

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Enquadramento	25
1.2	Definição do Problema e Principais Objetivos	26
1.3	Metodologia	27
1.4	Estrutura da Dissertação	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Fabricação Aditiva (FA)	31
2.1.1	Tecnologias de Fabricação Aditiva	36
2.1.2	Parâmetros Relevantes	47
2.2	Método de Elementos Finitos (MEF)	50
2.3	Otimização Topológica (OT)	51
2.4	Combinação entre FA e OT	54
2.5	Design para Fabricação Aditiva (DpFA)	55
2.6	Critérios para Seleção de Processo de Fabrico	60
3	DESENVOLVIMENTO	65
3.1	Linhas de Orientação de Projeto	65
3.1.1	Seleção de Processo de Fabrico	66
3.2	Componente Inicial	68
3.3	Requisitos Iniciais a Manter	69
3.4	Análise MEF do Componente Inicial	70
3.5	Otimização do Componente Inicial com vista à Fabricação Aditiva	75
3.6	Redesign do Componente Otimizado	76

3.7	Análise MEF dos Componentes Otimizados	78
3.8	Discussão de Resultados	83
3.9	Preparação do Componente Otimizado para Produção	84
3.10	Fabricação Aditiva (FA) vs Fabricação Subtrativa (FS)	85
4	CONCLUSÕES	89
4.1	Conclusão Inicial	89
4.2	Trabalhos Futuros	90
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	93
5.1	Referências	93
6	ANEXOS	101
6.1	ANEXO A - DATASHEET DO AÇO	101
6.2	ANEXO B - DATASHEET DO ALUMÍNIO	105
6.3	ANEXO C - DATASHEET DO TITÂNIO	111
6.4	ANEXO D - ITERAÇÕES DE CONVERGÊNCIA MALHA CASO 1	119
6.5	ANEXO E - ITERAÇÕES DE CONVERGÊNCIA MALHA CASO 2	123
6.6	ANEXO F - RESULTADOS DAS ANÁLISES AOS COMPONENTES A, B E C	127

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E PRINCIPAIS OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Durante as últimas décadas, temos vindo a assistir a grandes mudanças, invenções e evoluções nos mais diversos setores. A constante mutação dos padrões e das necessidades globais, obriga a que as indústrias tenham de se adaptar e atualizar rapidamente relativamente às mesmas, para deste modo conseguirem acompanhar este processo evolutivo [1]. A indústria aeroespacial é um bom exemplo, devido a ser um setor que está em grande crescimento, e assim procura novos desenvolvimentos e tecnologias, de forma a obter melhorias, com vista a fornecer uma maior qualidade e segurança aos seus produtos e serviços [2].

A elevada exigência e rigor imposto neste setor, condiciona à utilização das mais avançadas tecnologias, para que seja possível satisfazer os mais complexos requisitos. Desde que surgiram, os processos de FA têm vindo a mostrar um potencial interessante neste campo, devido à capacidade de fabricar componentes estruturais leves, mas simultaneamente resistentes, de geometria complexa e num menor espaço de tempo, quando comparado com outros processos mais tradicionais. Não é surpreendente que atualmente, esta indústria juntamente com a aeronáutica, represente a maior parcela relativamente à utilização destes processos, logo seguidas por muitas outras áreas como a médica/dentária e automóvel [2].

Para ser possível aumentar a competitividade no mercado, é necessário produzir bem, com qualidade e ao menor custo possível, ou seja, todo o processo produtivo precisa estar otimizado com vista à redução de custos de produção, e também à redução dos prazos de entrega. A otimização pode ser considerada como a utilização eficaz e eficiente dos recursos disponíveis. Neste sentido, e considerando a evolução tecnológica, a *SmarTech* em [3] apresenta a uma pesquisa com análise detalhada, onde é possível identificar as quatro principais variáveis ao nível de criticidade desta indústria. As mesmas estão representadas a baixo:

- Redução do peso do componente;

- Redução dos custos de produção;
- Redução do prazo de entrega;
- Redução dos impactos ambientais.

A liberdade de geometria permite a otimização estrutural das peças, utilizando o método de construção em treliça, reduzindo assim o excesso de material. Os testes iniciais mostraram uma redução do peso em cerca de 30%, mas posteriormente foi possível alcançar valores entre os 60% e os 70%.

Os especialistas desta indústria acreditam que é possível uma redução até 80% do tempo de fabricação de um componente [3]. Isto permitiria que a engenharia pudesse gastar mais algum tempo durante o desenvolvimento de componentes mantendo um curto prazo de entrega [3]. Apesar de existir cada vez mais uma maior preocupação pela sustentabilidade do planeta, e também de esta não ser uma das indústrias com maior contribuição para a poluição, o número de voos continua a aumentar, pelo que a redução de desperdício de material e a reutilização do pó restante são aspetos positivos na eficiência ambiental deste processo produtivo [4].

1.2 Definição do Problema e Principais Objetivos

O trabalho apresentado vem no seguimento de anteriores desenvolvimentos de investigação nesta área [4], [5], e tem por objetivo o desenvolvimento de uma peça seguindo critérios de *Design* para Fabricação Aditiva (DpFA), análise estrutural através do Método de Elementos Finitos (MEF), OT e *redesign* final. Assim pretende-se:

- Apresentar os aspetos importantes a ter em consideração para uma correta abordagem do problema, definindo as principais linhas de orientação para a execução de um trabalho desta natureza;
- Executar uma OT da peça original de forma a garantir um *design* livre, mas tendo em consideração a necessidade de manter alguns dos requisitos iniciais;
- Elaborar a comparação deste processo com os outros mais tradicionais.

1.3 Metodologia

Tendo em conta a execução dos objetivos anteriormente mencionados, definiu-se a metodologia da seguinte forma:

- Analisar o componente original, através do MEF, para estabelecer os valores de tensão máxima permitidos após a otimização. A secção 3.4 contém detalhadamente esta análise;
- Definir as variáveis e o objetivo da OT no componente original. Foram seguidas duas estratégias distintas, que posteriormente foram comparadas, e no final escolhida a mais viável. Na secção 2.2 pode ser vista detalhadamente esta comparação;
- Após a otimização e interpretação da mesma, proceder à remodelação da solução obtida, para se conseguir um *design* final menos orgânico;
- Conseguido esse *design* final, o componente otimizado é analisado por MEF novamente, para validar os níveis de tensão máxima instalada e verificar se há regiões onde pode ser melhorada a concentração de tensões;
- Na última fase, a de pré-produção, é criado um guia para DpFA, onde as limitações do processo são abordadas, para identificar eventuais problemas de *design* com o *design* de componentes otimizado. Juntamente com o guia de projeto, está um outro guia para seleção do processo mais adequado para o fabrico do componente.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente tese foi organizada em quatro capítulos, em que os dois primeiros consistem numa abordagem aos conceitos teóricos e trabalhos relacionados nesta área. Os restantes capítulos referem-se ao trabalho prático realizado e às conclusões obtidas do mesmo. Segue abaixo uma apresentação com breve descrição de cada um deles.

O primeiro capítulo é composto por uma breve introdução do tema, definição do problema, descrevendo assim os principais objetivos, metodologia utilizada para a

realização deste projeto e termina com a sua estrutura. O segundo contém a revisão da bibliografia realizada, abordando as sete categorias de processos e alguns dos trabalhos relevantes nesta área, para um conhecimento mais consolidado do estado da arte. O terceiro consiste na componente computacional. Inicialmente, são apresentadas linhas de orientação para o desenvolvimento de um projeto semelhante, bem como alguns critérios de seleção do(s) processo(s) mais adequado(s). Posteriormente, as etapas de modelação e otimização, onde os resultados obtidos são analisados e interpretados. Posteriormente, são apresentadas as vantagens e desvantagens do processo aditivo fazendo a comparação com processos subtrativos (tradicionais). Por último, no quarto apresenta-se as conclusões gerais retiradas, e possíveis trabalhos a realizar no futuro.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FABRICAÇÃO ADITIVA (FA)

2.1.1 TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO ADITIVA

2.1.2 PARÂMETROS RELEVANTES

2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

2.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA (OT)

2.4 COMBINAÇÃO ENTRE FA E OT

2.5 DESIGN PARA FABRICAÇÃO ADITIVA (DPFA)

2.6 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE PROCESSO DE FABRICO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fabricação Aditiva (FA)

Com a evolução das indústrias, surgiu a necessidade de criar rapidamente uma amostra para a representação de uma peça, ou até mesmo de um pequeno conjunto de peças, antes da comercialização. Este processo ficou conhecido como Prototipagem Rápida (PR), termo este que é atualmente usado nas mais diversas indústrias. Quando se fala em desenvolvimento de produto, a prototipagem é um conceito muitas vezes usado para descrever as tecnologias que criam produtos físicos utilizando dados digitais. Numa fase inicial, as tecnologias de FA foram consideradas tecnologias de PR, mas com o passar dos anos, com a evolução das mesmas e a melhoria na qualidade dos produtos fabricados nestas máquinas, passou a haver uma distinção entre estes dois conceitos [6]. Devido a atualmente ser possível fabricar peças finais utilizando somente a FA, e muitas outras próximas do produto final, levou ao aparecimento do termo Fabricação Rápida (FR), o qual foi adotado para diferenciar a natureza funcional das peças fabricadas por esta tecnologia [7].

FA é um termo utilizado para agrupar os diferentes processos de fabrico que utilizam diversas técnicas, em que cada uma delas é capaz de produzir peças feitas a partir de uma grande variedade de materiais, sejam estes polímeros, cerâmicos, metais, madeiras, biomateriais, entre outros. Uma breve história sobre o desenvolvimento da FA pode ser encontrada em [8]. Todas estas tecnologias são capazes de fabricar peças pela adição de material em sucessivas camadas, ao inverso do que acontece em processos mais tradicionais, que são considerados subtrativos, como é o caso da maquinagem. Estas tecnologias estão definidas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) na norma ASTM F2792-12A [9] como um processo que junta materiais para formar objetos, a partir de dados digitais provenientes do modelo em três dimensões (3D). Em 2009, foi criado um *comitê* técnico dentro da ASTM designado de F42, para desenvolver as normas de FA [9].

Apesar de esta tecnologia apenas ter sido apresentada como aplicação industrial ao longo das últimas décadas, as primeiras noções sobre FA, que posteriormente foram aprofundadas e melhoradas, surgiram por volta de 1890, quando Blather em [10] sugeriu um método (por camadas), para fazer um molde para mapas de relevo topográfico. No seu método, as linhas de contorno topográficas foram impressas em placas de cera, que foram cortadas ao longo dessas mesmas linhas de contorno e, de seguida, empilhadas umas placas sobre as outras. Para finalizar, as camadas foram suavizadas e é então que surge uma superfície tridimensional, que correspondia ao terreno [8]. Nesse seguimento, criando camada por camada de um objeto 3D, a FA foi adaptada em 1979 por Housholder [11], que patenteou a primeira descrição de um processo de sinterização a *laser* em pó, na qual as camadas podiam ser solidificadas seletivamente. Como os processos à base de camadas se começaram a tornar melhor definidos, tornou-se evidente que havia oportunidades para ser utilizado industrialmente [11]. Foi então, na década de 1980, que as técnicas de FA polimérica apareceram no mercado, mais precisamente em 1987, quando a *3D Systems* desenvolveu o processo de *Stereo-Lithography Apparatus* (SLA), que solidificava camadas finas de polímero líquido sensível à luz ultravioleta (UV), usando um *laser* [12]. Após esta descoberta, outras e diferentes tecnologias de FA foram desenvolvidas, tais como *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), *Fused Deposition Modeling* (FDM), a Impressão 3D (3DP), entre outras, [6], [13], [14]. Todos os processos diferem entre si pelos tipos de geometrias que podem ser criadas, os materiais que podem ser utilizados, assim como a precisão e a qualidade das peças finais produzidas [8]. O desenvolvimento à procura de novos processos continuou a ser feito até 1991, altura em que o foco neste campo foi deslocado para a melhoria dos processos que já haviam sido criados anteriormente [15]. As melhorias focavam principalmente o aumento da velocidade de construção das peças, e também o incremento e diversificação de materiais utilizados para fabricar essas peças [16].

Foi no seguimento destes desenvolvimentos que, em 1995, a *Fraunhofer ILT* desenvolveu o início daquilo que iria dar origem ao *Selective Laser Melting* (SLM), mas foi apenas dois anos mais tarde, em 1997, que Carl Deckard criou e patenteou o primeiro sistema FA para metal, através do processo *Selective Laser Sintering* (SLS). Na altura

Deckard ainda era aluno na Universidade do Texas, em Austin. Uns anos mais tarde, a *EOS GmbH*, empresa que se dedica ao desenvolvimento de sistemas similares, acabou por obter essa mesma patente, como chave estratégica para a industrialização. Ainda em 1997, foi fundada a empresa *AeroMet*, que desenvolveu o processo chamado de *Laser Additive Manufacturing (LAM)*, que usou um *laser* de alta potência e pó de uma liga de titânio [12]. Contudo, este processo acabou por desaparecer no ano seguinte. Apesar de todos estes desenvolvimentos, foi apenas no início dos anos 2000 que surgiram no mercado as máquinas de FA metálica, sendo este um método com enormes oportunidades no mercado. Atualmente a FA de metal é o principal foco de desenvolvimento destes métodos de fabricação [12].

O princípio básico desta tecnologia, tem origem na criação de um modelo 3D utilizando um *software Computer-Aided Design (CAD)*. Após inserção desse modelo na máquina da FA, a construção do mesmo é feita através da criação e fusão de múltiplas camadas de secção muito fina quase em duas dimensões (2D), ou seja, é adicionado material camada por camada, sucessivamente, até replicar o modelo digital 3D [17]. A Figura 1 auxilia à compreensão deste princípio de funcionamento. As tecnologias de FA produzem peças através da polimerização, fusão ou sinterização de materiais, em processos de camadas predeterminadas, sem necessitar de ferramentas, e sem desperdício de material. A FA permite liberdade durante a execução do projeto, pois é possível a produção de geometrias mais complexas, que podem até mesmo ser impossíveis de produzir, utilizando outro processo mais convencional [7].

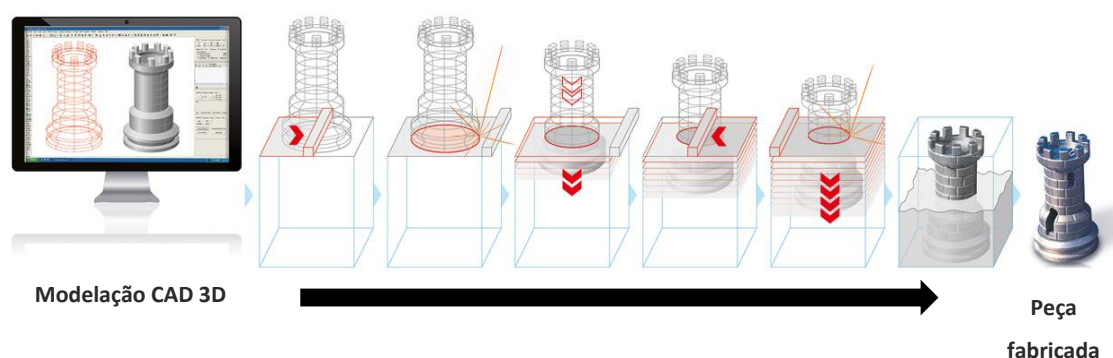


Figura 1 - Exemplo do princípio básico de produção por FA. Adaptado de [18].

Em FA as camadas de cada peça são criadas por corte virtual de dados CAD com auxílio de *software* especializado, como está representado na Figura 2. Todas as tecnologias de FA trabalham com este princípio, no entanto, a espessura das camadas depende dos parâmetros e sistema utilizado. Cada uma das camadas, que determinam a peça, é construída sobre o plano horizontal (plano XOY), sendo cada uma delas sobreposta pela seguinte, segundo o eixo Z. Em todos os processos de FA, as camadas são visíveis na superfície da peça, o que influencia a qualidade, ou seja, a rugosidade da superfície da peça acabada. Este fenómeno é conhecido como o efeito de escada (Figura 2), e é definido pela relação entre a espessura da camada e a orientação de uma superfície. Quanto mais fina for a camada, mais longa será a produção da peça, mas claro, melhor será a qualidade [17].

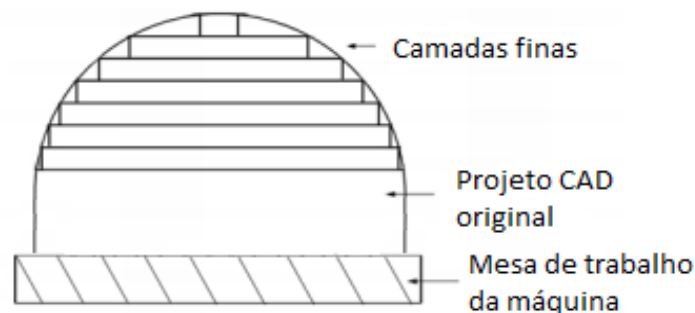


Figura 2 - Representação de uma peça produzida por FA. Adaptado de [17].

Outros processos de fabricação, requerem uma análise cuidadosa e detalhada da geometria da peça, para determinar fatores, assim como a sequência de produção ou as ferramentas e processos adicionais, que podem ser necessários para finalizar a peça. Embora isto pareça muito simples, pois a FA necessita apenas de alguns detalhes dimensionais, é também necessária uma boa quantidade de conhecimento sobre o funcionamento da máquina de FA, bem como dos materiais a serem usados [6].

Embora muitas máquinas de FA usem métodos e materiais semelhantes, existem diferenças fundamentais entre estes processos que são cruciais na seleção de qual o processo a ser usado para a produção de uma peça [11]. Estas diferenças são geralmente classificadas pela geometria da peça, especificações da máquina e materiais. Ao olhar para a geometria da peça, a FA fornece uma grande amplitude na liberdade geométrica, em comparação com a maioria dos processos de fabrico. O principal fator para este

aumento na liberdade de *design* é a capacidade de produzir facilmente formas como reentrâncias e saliências. Também existem limitações para as capacidades da FA, tais como o tamanho do componente [19]. Para peças de pequeno e médio porte, geralmente não existe qualquer problema de execução, contudo, as grandes peças, apesar de terem algumas restrições e dificuldades, também podem ser criadas. Para as peças maiores do que a mesa de trabalho da máquina, é necessário dividi-las, sendo produzidas separadamente, e posteriormente unidas. Porém, ao dividir uma peça, o processo de a unir novamente, pode ser algo difícil, demorado e caro [11].

Ao olhar para a FA, muitas são as especificações que variam entre diferentes máquinas. Um exemplo é a velocidade máxima. As diferentes velocidades máximas, indicam diferentes índices de produtividade. Para uma peça de grande porte, a tecnologia de FA é mais lenta do que muitos dos métodos de fabricação tradicional [11]. A taxa de produtividade da FA pode aumentar por utilização de máquinas que incorporem vários *lasers* ou extrusões, dependendo do processo. Para alguns processos, a maquinagem como pós-processamento é necessária, para a remoção das estruturas de suporte que ajudam a estabilizar a peça durante a sua produção [11]. Outra especificação que varia de máquina para máquina, é a precisão, a qual é muito importante para a qualidade. Peças com dimensões estruturais críticas, precisam ser produzidas em máquinas de FA cuja exatidão seja adequada com as tolerâncias exigidas.

A maior diferença entre as tecnologias de FA deverá ser a seleção de materiais que as máquinas podem utilizar. Se um processo constrói peças de aço, por exemplo, outro processo pode não ser capaz de fazer o mesmo. Cada máquina tem um conjunto específico de materiais possíveis de escolher para produção de peças. Muitas vezes, ao escolher um material específico para fabricar uma determinada peça, um projetista é obrigado a cingir-se a um menor número de tecnologias [19].

Atualmente, um dos maiores problemas é a seleção de materiais e o seu impacto sobre o projeto [19]. Em alguns casos, a seleção de um material para uma peça, em combinação com um processo específico, define as limitações geométricas das peças. Com um leque diverso de materiais possíveis para escolher, um projetista deve estar ciente de todas as diferentes propriedades dos materiais, e quais as limitações que implicarão para o projeto. Apesar da ampla gama de materiais que podem ser

produzidos por FA, ainda há a necessidade de desenvolver compatibilidades com mais materiais, pois isso irá criar mais oportunidades e novas aplicações para os processos FA [19].

2.1.1 Tecnologias de Fabricação Aditiva

Apesar de, na gíria, ser usado o termo "Impressão 3D" como sinónimo para qualquer um dos processos de FA, existem diversos processos, bem como diversas tecnologias, que variam no método de fabricação. Estas técnicas variam consoante o material e/ou a tecnologia utilizada. Em 2010, o *comité* F42 da ASTM definiu um conjunto de normas e padrões, que classificam distintamente cada um dos processos de FA em 7 categorias [13], [20] indicadas abaixo:

- *VAT Photopolymerization* (VATP);
- *Powder Bed Fusion* (PBF);
- *Binder Jetting* (BJ);
- *Material Jetting* (MJ);
- *Sheet Lamination* (SL);
- *Material Extrusion* (ME);
- *Directed Energy Deposition* (DED).

Durante este capítulo irá ser abordado cada um destes processos, bem como cada uma das tecnologias a eles associadas.

2.1.1.1 *VAT Photopolymerization* (VATP)

O processo VATP consiste na cura seletiva de resina de um foto-polímero líquido existente dentro de uma cuba, através da polimerização do mesmo recorrendo ao uso de luz UV [20], ou seja, essa luz UV é projetada seletivamente para a resina, com auxílio de espelhos, de forma a efetuar a sua cura. Assim, após cada nova camada curada, a plataforma onde o objeto é criado move-se para baixo, para dar origem a uma nova camada [14]. A tecnologia SLA foi a primeira tecnologia de FA a ser comercializada, e rege-se por este processo. Um esquema meramente representativo pode ser visto na

Figura 3 [21]. Como o processo utiliza material no estado líquido para formar objetos, este não necessita de nenhum suporte estrutural adicional durante a fase de fabrico, ao contrário do que acontece nos métodos de fabricação onde o material é fornecido em pó, em que é criado um apoio ao material “suspenso”.

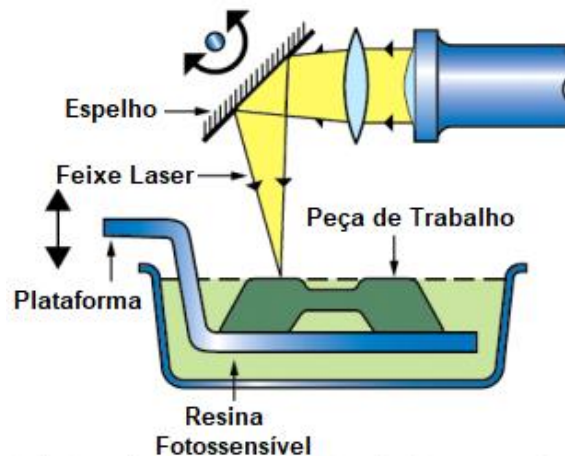


Figura 3 - Esquema representativo da tecnologia SLA. Adaptado de [21].

A tecnologia SLA tem uma boa precisão e bom acabamento, contudo, na maioria das vezes, requer estruturas adicionais e pós-processamentos para que a peça se torne resistente o suficiente para uso estrutural. Este processo de foto-polimerização pode causar defeitos, tais como poros, e estes precisam de ser retificados ou preenchidos com resina, para que a peça tenha qualidade. Após concluídas algumas peças, podem necessitar de um tratamento adicional, como a passagem de lixa para remover material em excesso [11].

2.1.1.2 Powder Bed Fusion (PBF)

O processo PBF resulta da fusão seletiva de regiões de pó, após o mesmo ser atingido por energia térmica proveniente de um *laser* ou feixe de elétrons [20]. Este processo inclui as seguintes técnicas de impressão: DMLS, SLM, SLS e *Electron Beam Melting* (EBM).

Das quatro tecnologias referidas, apenas o EBM utiliza feixe de elétrons para fundir material e, como tal, este método requer vácuo, mas isto não é fator que influencie o

seu desempenho, pois pode perfeitamente ser usado para o fabrico de peças funcionais, quer de metais, quer de ligas metálicas. Todos os processos do PBF envolvem a aplicação e difusão de uma nova camada de material em pó sobre camadas anteriores, e isto pode ser feito de diferentes formas, através de rolo ou uma lâmina [13]. Na Figura 4 estão representados dois esquemas referentes a estas tecnologias.

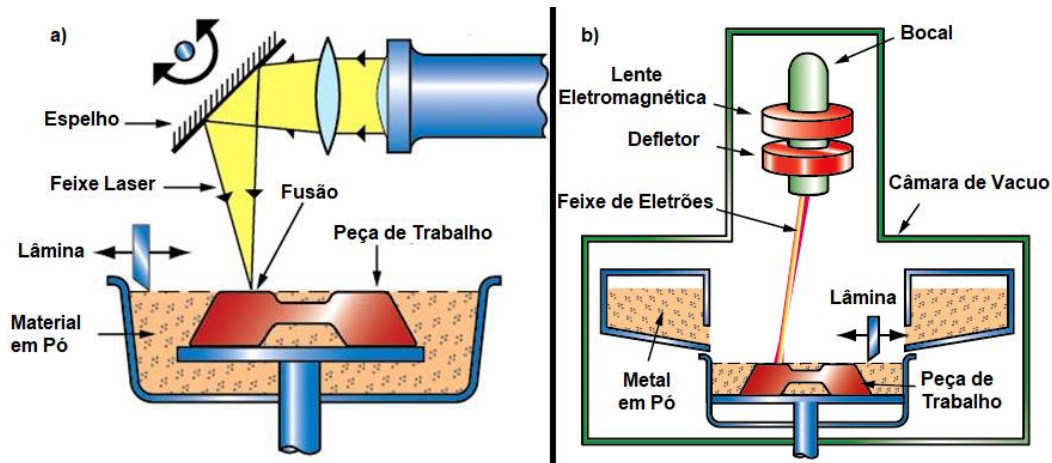


Figura 4 - Esquema representativo das tecnologias: a) DMLS, SLM e SLS; b) EBM. Adaptado de [21].

A tecnologia SLS era inicialmente utilizada apenas na sinterização de plásticos, mas posteriormente passou a fazer também a fusão de pós metálicos e cerâmicos [22]. Estes tipos de máquinas são constituídas por três elementos principais, que são: uma fonte de energia térmica (responsável pela fusão do material), um sistema de controlo dessa energia e um mecanismo para adicionar novas camadas de pó sobre o material fundido anteriormente. Uma das vantagens desta tecnologia é a fabricação de peças sem necessidade da criação de estruturas de suporte adicionais, devido ao material em pó proporcionar o apoio adequado durante a construção. A plataforma onde a peça é construída está inserida dentro de uma câmara com temperatura controlada, que geralmente é colocada ligeiramente abaixo do ponto de fusão do material, para que seja possível reduzir a intensidade do *laser*. Após fabricadas, as peças requerem um arrefecimento lento ao ar livre, para consolidarem bem.

SLM é muito idêntico à tecnologia SLS, contudo é normalmente mais rápido, requerendo a utilização de gás inerte e, devido à elevada energia utilizada para a fusão do material, a temperatura da peça aumenta durante a junção das várias camadas, o que influencia

as propriedades finais da peça. A eficiência energética desta tecnologia é bastante baixa, rondando os 20% [21].

DMLS é uma outra tecnologia idêntica ao SLS, porém esta consiste apenas na criação de peças metálicas e cerâmicas. Se for necessário, o DMLS permite a criação de peças totalmente densas, devido a ser possível fazer uma maior compactação do material [21].

EBM é mais um processo baseado nesta tecnologia, contudo diferencia-se pelo uso de um feixe de elétrons de alta potência, em vez de um *laser* como as anteriores tecnologias. EBM fornece peças com excelentes propriedades, devido à distribuição uniforme da temperatura de fusão durante o fabrico, o que significa que é possível conseguir características semelhantes às provenientes de peças fundidas. Pode então concluir-se que esta tecnologia permite a criação de peças com elevada qualidade [6], [21].

Obtidas as peças, é necessário proceder à remoção do excesso de pó e, quando pretendido, pode-se efetuar um pós-processamento para aumentar a densidade, e assim também a resistência mecânica. Contudo, este tipo de trabalhos adicionais aumenta o tempo de fabrico das peças [21].

2.1.1.3 *Binder Jetting* (BJ)

O processo BJ provém do depósito seletivo de um agente adesivo líquido para aderir ao pó dos materiais, e desta forma promover a sua união [20]. O pó é distribuído na superfície onde de seguida é depositado o agente adesivo líquido, que faz com que o material seja consolidado quimicamente. Após isto, é adicionada uma nova camada de pó à superfície e o processo é repetido, até que toda a compilação esteja concluída [13], [21]. Pode dizer-se que esta tecnologia utiliza sempre dois materiais: um material-base, em pó, e um agente ligante, líquido. O segundo atua como um adesivo entre as camadas de pó. Na Figura 5 é possível ver um esquema representativo desta tecnologia.

A tecnologia utilizada por este processo é a 3DP. BJ é uma tecnologia bastante abrangente, pois permite a impressão de diversos materiais, sendo que pode imprimir

a cores, utiliza materiais metálicos, poliméricos e também cerâmicos [13]. O fabrico de peças é geralmente mais rápido quando comparado com outras tecnologias. Uma outra vantagem é a possibilidade de misturar dois materiais diferentes, pois permite que exista um largo número de combinações que proporcionam diferentes propriedades mecânicas na peça produzida. Apesar de ter uma boa cadência (velocidade de processamento), este método de ligação nem sempre confere as características pretendidas para peças estruturais, podendo ser necessário um pós-processamento adicional, o qual irá alongar o tempo de produção [13].

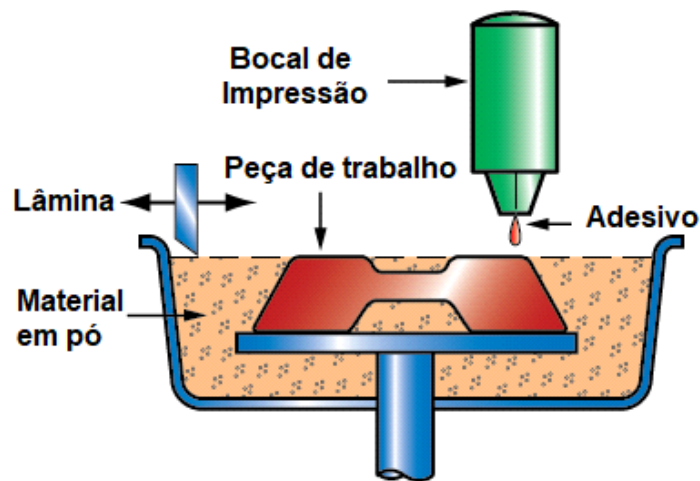


Figura 5 - Esquema representativo da tecnologia 3D. Adaptado de [21].

O pós-processamento é frequentemente utilizado para melhorar as propriedades mecânicas da peça produzida, apesar de esta necessitar ser deixada a arrefecer na máquina para que possa solidificar completamente, e assim obter um acabamento de qualidade [6], [14].

2.1.1.4 *Material Jetting (MJ)*

O processo MJ usa um método semelhante a uma impressora de tinta a duas dimensões, pois consiste em depositar seletivamente gotas de material, sucessivamente até obter o formato desejado de material [20]. Na Figura 6 está representado um esquema básico deste processo [14]. Por norma, este tipo de máquinas é constituído por duas ou mais cabeças de impressão, sendo uma para criar estrutura(s) de apoio ou suporte, e a(s) outra(s) para construir a peça. O material pode mesmo ser alterado durante a fase de

construção. Desde modo, e havendo vários bocais, é possível combinar diferentes materiais. As gotas de material não utilizado são recicladas, sendo enviadas de volta para o sistema de impressão.

Inkjet Printing (IJP) é utilizado para distribuir gotas de material sobre a zona da superfície pretendida. A natureza do uso de gotas, limita o número de materiais disponíveis para uso.

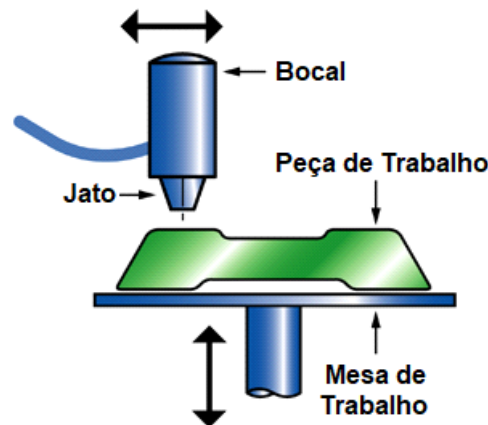


Figura 6 - Esquema representativo da tecnologia IJP. Adaptado de [21].

Os materiais frequentemente utilizados por serem os mais adequados para este sistema, são os polímeros e os cerâmicos, devido à sua natureza viscosa e capacidade para formar gotas. A viscosidade é uma característica determinante para esta tecnologia. Existe a necessidade não deixar o reservatório esvaziar, pois pode afetar a velocidade de impressão. Ao invés de um fluxo contínuo de material, as gotas só são depositadas quando necessário. As mesmas são libertadas por ação de uma alteração na pressão do bocal, devido a atuadores térmicos ou piezoelétricos. Os atuadores do tipo térmico, têm uma taxa de depósito de gotas muito rápida, e usam fina película como resistência para formar a gota. O método piezoelétrico, é muitas vezes considerado melhor, pois apesar de não ser tão rápido, permite uma vasta gama de materiais a serem utilizados [13].

Como é necessária a criação de estruturas suporte para construção das peças, estas podem ser removidas através da utilização de uma solução de hidróxido de sódio ou de jato de água [13]. Como esta tecnologia tem uma alta precisão, a tarefa de pós-

processamento torna-se mais limitada em termos do que é possível melhorar, pois as características funcionais e estéticas de uma determinada peça são definidas durante a fase de impressão [6], [13].

2.1.1.5 Sheet Lamination (SL)

O processo SL resulta da compilação de chapas, tiras ou folhas de material, que são ligadas entre si de modo a criar a peça pretendida [20]. As duas tecnologias utilizadas são: *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) e *Laminated Object Manufacturing* (LOM) [6], [21]. Este tipo de tecnologias têm uma utilização frequente para modelação estética e não são adequados para uso estrutural, devido a não conferirem boa resistência mecânica. A tecnologia UAM utiliza folhas ou fitas metálicas, que estão ligadas entre si por soldadura por ultrassons. Contudo, esta tecnologia requer um pós-processamento para remoção do material que não foi unido durante o fabrico. Na Figura 7, pode ser visto esquematicamente este processo. Visto que o pós-processamento é sempre necessário, de forma a facilitar e atingir melhores acabamentos superficiais. Esta tecnologia pode ser combinada com uma fresa controlada através de Comando Numérico Computorizado (CNC) [14], [21]. UAM utiliza metais como o alumínio, cobre, aço inoxidável e titânio, entre outros [23]. Uma das suas vantagens é que requer baixa energia para ligar materiais, mesmo que sejam distintos, devido a não ocorrer fusão durante a sua ligação.

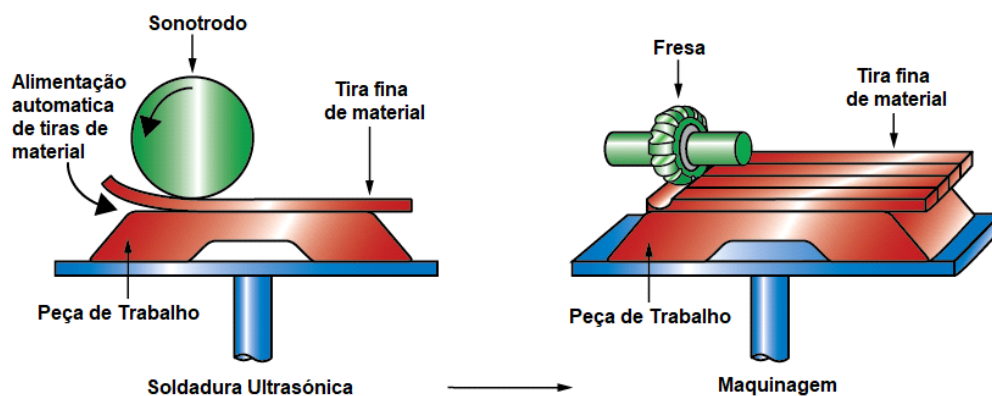


Figura 7 - Esquema representativo da tecnologia UAM. Adaptado de [21].

LOM foi a primeira técnica a utilizar a criação de peças através da junção de folhas de material. A sua abordagem é semelhante à tecnologia UAM, mas para fazer a ligação

das folhas de material, usa um adesivo sensível à temperatura, em vez de soldadura entre as folhas pré-laminadas com adesivo, que é seletivamente aquecido. Esta tecnologia utiliza ainda um método choque transversal durante o processo de fabricação, para permitir uma remoção dos excessos durante o pós-processamento [6], [14], [21].

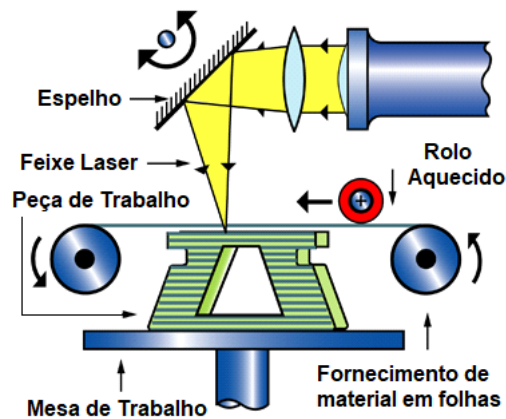


Figura 8 - Esquema representativo da tecnologia LOM. Adaptado de [21].

2.1.1.6 Material Extrusion (ME)

O processo ME resume-se ao material ser depositado seletivamente através de um bocal. Nesta categoria de processo, a peça é construída através do material que é depositado [20]. Para uma visão geral do processo de extrusão de material, ver Figura 9. Neste processo, o material ao passar através do bocal, é aquecido e, em seguida, é depositado seletivamente. Neste caso, a mesa de trabalho é quem faz o movimento, pois o bocal está fixo. Após isso, a mesa de trabalho desce e volta a repetir-se o ciclo, camada por camada. A tecnologia predominante desta categoria de processo é o FDM. Este usa bobines de filamento termoplástico, considerado um plástico (polímero artificial) facilmente conformado e moldado, que é fundido durante a passagem no bocal. Esta tecnologia é bastante utilizada em muitas impressoras domésticas, devido ao baixo custo. A precisão e a velocidade são baixas, quando comparado a outros processos, contudo, se todos os parâmetros forem bem controlados, é possível obter peças de alguma qualidade. Devido ao diâmetro de saída do bocal, por exemplo, durante a criação de um cubo, não é possível fazer arestas vivas (linhas formadas pelo encontro

de duas superfícies de peças ou elementos da construção), pois existirá sempre um raio, por muito pequeno que seja. Uma das vantagens é que, tal como no BJ, esta tecnologia pode conter um ou vários bocais de alimentação de material, o que permite a junção de diferentes materiais ou a utilização de um bocal para impressão de estruturas de suporte e um outro para a produção da peça [14], [21].

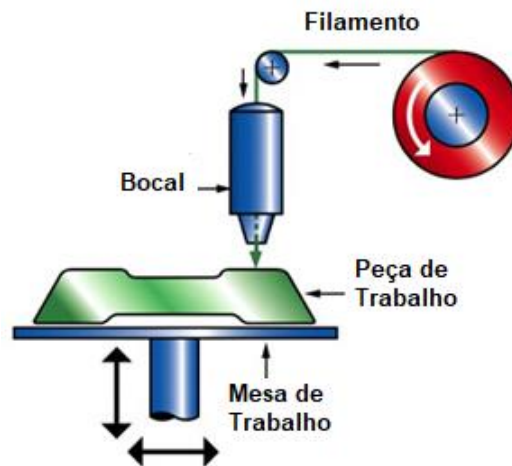


Figura 9 - Esquema representativo da tecnologia FDM. Adaptado de [21].

É comum o uso de pós-processamentos para melhorar a aparência visual das peças fabricadas. Estes métodos têm sido explorados por Gibson *et al.* [6], através da melhoria da transmissividade de material, o que inclui o aumento da temperatura e o uso de resina. Experiências feitas com resina de ciano acrilato, têm sido muitas vezes utilizados para melhorar a resistência das peças, resultando num aumento de 5% na transmissividade da peça em 30 segundos de aplicação [6].

2.1.1.7 Directed Energy Deposition (DED)

O processo DED utiliza energia térmica para fundir materiais, e desta forma uni-los. Esta categoria de processos abrange diversas tecnologias como: LENS, *Electron Beam Direct Manufacturing* (EBDM), *Direct Metal Deposition* (DMD), entre outras tecnologias complexas de FA. Estes tipos de processos são normalmente utilizados para reparar ou adicionar material a peças já existente [6]. A deposição é feita através de um bocal montado sobre um braço robótico de múltiplos eixos, que deposita material sobre a superfície especificada, onde, simultaneamente com a deposição, ele é fundido pela energia térmica (normalmente *laser*), e posteriormente solidifica. O processo é

semelhante ao princípio do ME, mas neste caso o bocal pode mover-se em múltiplas direções, ao contrário daquilo que acontecia no ME, em que o bocal é fixo e apenas a mesa de trabalho tem movimento [20]. Neste caso, o material pode ser depositado a partir de qualquer ângulo, desde que as máquinas permitam. Este processo permite a utilização de materiais com polímeros e cerâmicos, mas, por norma, apenas é usado com metais [14].

Na Figura 10 é possível visualizar um esquema simples, que resume basicamente estas tecnologias. Existem diversas variantes deste processo, como por exemplo, o estado do material fornecido, pois pode ser em pó metálico ou em fio. Outra variante é o tipo de energia térmica usada, sendo o *laser* a via mais comum, embora também possa ser usado um feixe de eletrões ou até um arco de plasma [6]. A compilação pode facilmente seguir superfícies complicadas já existentes em objetos que necessitam ser reparados [14].

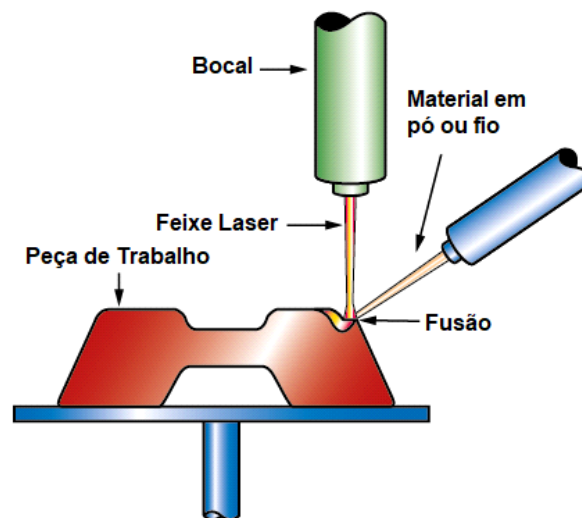


Figura 10 - Esquema representativo das tecnologias EBDM, DMD e LENS. Adaptado de [21].

Desde o seu aparecimento e desenvolvimento, que estas tecnologias contêm várias semelhanças, bem como muitas diferenças também entre si. Os mecanismos e materiais utilizados juntamente com as diferentes tecnologias, resultaram em diversas formas de categorizar os processos de FA. Em resumo, as principais tecnologias, processos e materiais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo das tecnologias, processos e materiais aplicados à FA [6], [13], [14].

Processo	Descrição	Tecnologias	Materiais
<i>Vat Photopolymerization (VATP)</i>	Foto-polímero líquido numa cuba é seletivamente curado por polimerização de luz UV	<i>Stereolithography Apparatus (SLA)</i>	Polímeros e Cerâmicos
<i>Powder Bed Fusion (PBF)</i>	Energia térmica funde seletivamente em regiões de uma cama de pó	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	Polímeros, Metais, Compósitos e Cerâmicos
		<i>Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i>	
		<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	
		<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>	
<i>Binder Jetting (BJ)</i>	Agente adesivo líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó	<i>3D Printing (3DP)</i>	Polímeros, Metais, Cerâmicos
<i>Material Jetting (MJ)</i>	Gotas de material são depositadas seletivamente	<i>Inkjet Printing (IJP)</i>	Polímeros e Compósitos
<i>Sheet Lamination (SL)</i>	Folhas de material são unidas para formar um objeto	<i>Laminated Object Manufacturing (LOM)</i>	Híbridos, Metais e Cerâmicos
		<i>Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)</i>	
<i>Material Extrusion (ME)</i>	Material é seletivamente depositado através de um bocal	<i>Fused Deposition Modelling (FDM)</i>	Polímeros
<i>Directed Energy Deposition (DED)</i>	Concentra a energia térmica e funde materiais à medida que os deposita	<i>Direct Metal Deposition (DMD)</i>	Metais e Metais Híbridos
		<i>Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM)</i>	
		<i>Laser Engineered Net Shaping (LENS)</i>	

2.1.2 Parâmetros Relevantes

Existem inúmeros fatores que influenciam os processos de FA. Para que seja possível obter peças com qualidade, é necessário ajustar de forma correta os parâmetros que têm maior influência diretamente no produto final, os quais são representados na Equação (1) [24]:

$$E_V = \frac{P}{h \times t \times v} \quad (1)$$

onde:

E_V - Densidade de energia da fonte térmica [J/mm^3];

P - Potência da energia térmica [W];

h - Espaçamento entre passagens [mm];

t - Espessura da camada [mm];

v - Velocidade de varrimento [mm/s].

Os parâmetros estão ilustrados na Figura 11, para que se obtenha uma melhor compreensão dos mesmos.

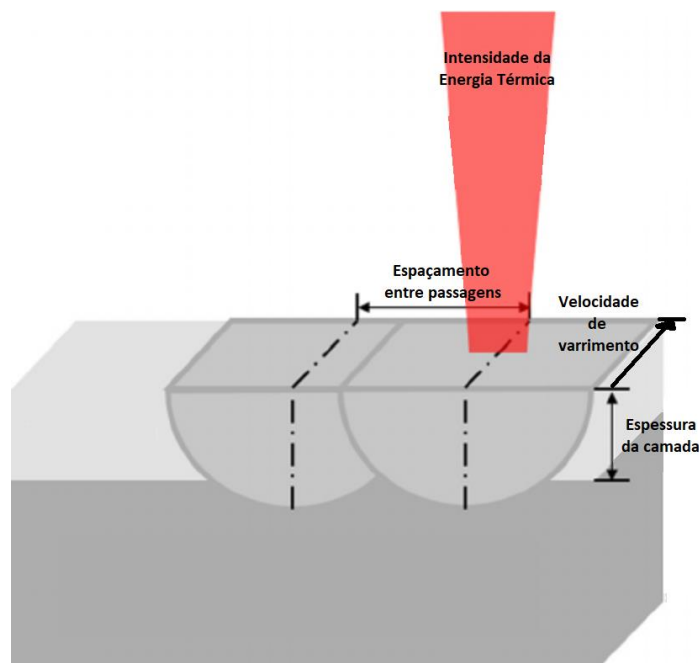


Figura 11 - Esquema representativo dos principais parâmetros de FA. Adaptado de [25].

Foi adotado o processo SLM para representar os processos de FA metálica, devido a este ser o processo definido como preferencial nos cálculos efetuados em 3.1.1. Apesar de

haver algumas diferenças, estes parâmetros são semelhantes, ou seja, podem conter valores distintos, mas têm o mesmo tipo de finalidade na peça.

Desta forma, é necessário garantir que E_V tem um valor suficiente para garantir a fusão do pó. Assim, a densidade de energia necessária para fundir um determinado material (E_m), apresentada em $[J/mm^3]$, depende das propriedades térmicas do mesmo e é calculado através da Equação (2) [24]:

$$E_m = c \cdot \rho(T_m - T_a) \quad (2)$$

onde:

c - Calor específico $[J/kg \cdot K]$;

ρ - Massa volúmica $[kg/mm^3]$;

T_a - Temperatura ambiente $[K]$;

T_m - Temperatura de fusão do material $[K]$.

Segundo a Equação (1), quanto maior a densidade de energia imposta durante o processo, maior será a densidade da peça, porém isto não é totalmente verdade, pois a potência da fonte térmica (P) pode assumir diferentes valores. Por exemplo, se o seu valor for demasiado baixo não ocorrerá fusão total do pó, no entanto, se apresentar uma potência muito alta, causa fusão em excesso, o que terá o papel inverso. Por outro lado, demasiada fusão causa escorrimento de material e, por sua vez, mau acabamento. Então, como pode ser visto na Figura 12, segundo Beal [26], a melhor forma de parametrizar a densidade de energia é ajustar a velocidade de varrimento e não a potência da fonte térmica [26].

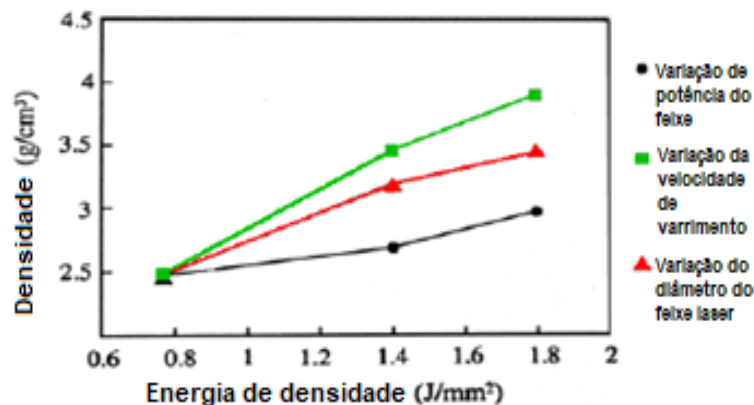


Figura 12 - Influência de E_V na densidade final da peça. Adaptado de [26].

O espaçamento entre passagens é outro ponto essencial. Em [27] é possível ver que há um valor máximo de espaçamento, para que seja obtido um mínimo de porosidade. Também na Figura 13, é mostrado que o espaçamento ideal envolve uma sobreposição parcial da passagem anterior, de tal forma que seja possível uma boa ligação entre o material subsequentemente fundido.

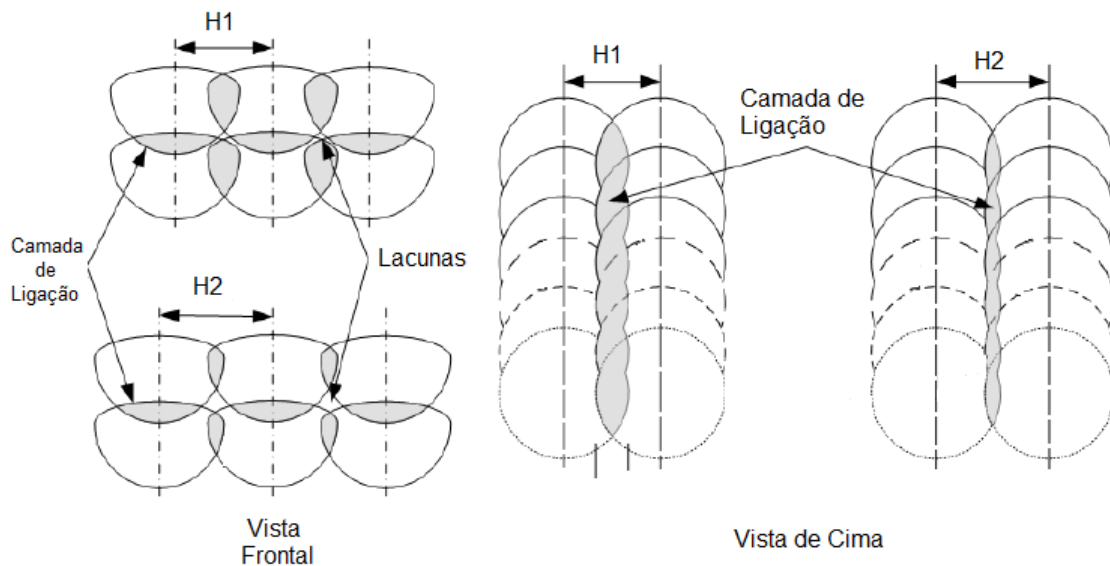


Figura 13 - Influência do espaçamento entre passagens. Adaptado de [26].

Não menos importante é a espessura de cada camada. Na Figura 14, observa-se que os valores ideais variam em função das granulometrias dos pós, contudo, tal como acontece com o espaçamento entre passagens, onde é necessário garantir uma boa fusão e ligação à camada anterior [24].

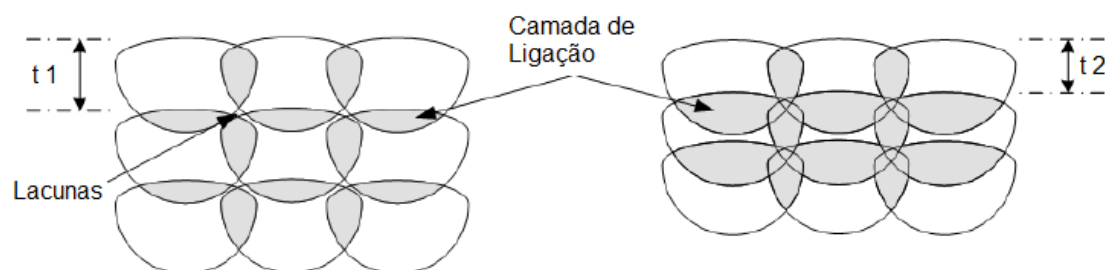


Figura 14 - Influência da espessura de cada camada. Adaptado de [26].

2.2 Método de Elementos Finitos (MEF)

A necessidade de prever o comportamento dos materiais quando estes são submetidos a determinadas solicitações mecânicas, provocou o desenvolvimento e a utilização de metodologias computacionais. O MEF é uma ferramenta soberana que permite a simulação computacional. Adequado para diversos problemas de análise nas mais diversas áreas, desde a medicina à engenharia, o principal objetivo de uma análise através do MEF é simular o comportamento de uma determinada estrutura, em função de determinadas cargas. Desta forma, para ser possível obter resultados próximos da realidade, devem ser considerados todos os fatores envolventes [28].

A essência por trás do MEF consiste na utilização de sistemas de equações sob a forma matricial, para cada elemento dado pela Equação (3) [28]:

$$F_e = K_e \cdot A_e \quad (3)$$

onde:

- F_e - Vetor de forças de um elemento;
- K_e - Matriz de rigidez de um elemento;
- A_e - Vetor de variáveis de um elemento.

Uma peça ou estrutura é composta por vários elementos (podendo atingir números na casa das centenas, milhares, dezenas de milhar, etc.). Portanto, o sistema global de equações é traduzido por [28]:

$$R + F = K \cdot A \quad (4)$$

onde:

- R - Vetor global de reações numa estrutura;
- F - Vetor global de forças;
- K - Matriz de rigidez global;
- A - Vetor global de variáveis.

Após obtenção de resultados, é necessário proceder à análise ou avaliação dos mesmos.

2.3 Otimização Topológica (OT)

Atualmente durante a execução de um projeto estrutural, a simulação através de MEF, juntamente com a OT, tornaram-se pontos indispensáveis. Desde o seu aparecimento que a OT se tornou uma ferramenta importante para o projeto de peças que suportam cargas [29], [30]. O desenvolvimento de um produto leve e eficiente, é um dos principais condutores por trás da crescente utilização da FA na produção em série. As técnicas de OT consistem em métodos iterativos para explorar várias soluções de projeto possíveis, e resultam normalmente em componentes com formas orgânicas que imitam estruturas naturais eficientes. Apesar da enorme flexibilidade de produção da FA, é um erro pensar que os projetos são otimizados para suportar carga e, após isso, resta unicamente e simplesmente serem impressos. Exatamente por ser possível implementar praticamente qualquer forma que possa surgir através de OT, o resultado pode ser tal que torna ineficiente a sua produção. A criação de peças sem estruturas de suporte é a melhor prática de DpFA, contudo implica inevitavelmente que o projetista abdique de bastante tempo para planejar como será construída uma peça, de forma a reduzir, ou mesmo eliminar, as estruturas de apoio necessárias [31].

A OT é uma técnica muito utilizada quando se pretende reduzir o peso de um componente. Esta calcula a distribuição de material ideal dentro de um domínio do projeto, variando a densidade dos seus elementos, através da remoção de material em excesso ou que não é necessário para a peça suportar as cargas previstas, sem que haja ocorrências nefastas. O algoritmo de otimização apresenta uma disposição estrutural que descreve os principais caminhos de carga, sob a forma de uma distribuição da densidade do domínio de criação [32], [33], [34].

Em mais detalhe, o projetista começa pela criação da peça com um volume inicialmente sólido, descrevendo a região de projeto. Após aplicar cargas e restrições, o algoritmo de otimização determina, através de um processo iterativo, se uma região na peça de projeto deve conter material ou não. Por conseguinte, resulta numa distribuição de densidade. Assim, os algoritmos de OT podem ser vistos como métodos de distribuição ideal de material. Existem varias abordagens, mas existem duas mais relevantes, usadas para definir a função objetivo da OT.

A primeira abordagem, é a clássica otimização que pretende encontrar uma distribuição de densidade de massa global mínima, Equação (5), ou seja, o mínimo peso, de tal modo que o conjunto suporte as restrições impostas (por exemplo, deslocamento ou tensão máxima admissível) [35], [36]. Desta forma, é definido por [37]:

$$\begin{aligned} V(\rho), \rho &\in [0,1] \\ K(\rho)u(\rho) &= \phi \\ \sigma_{VM}(\rho) &\leq \frac{\sigma_{ced}}{f} \end{aligned} \quad (5)$$

onde:

- K - Matriz de rigidez global;
- u - Vetor deslocamento;
- σ_{VM} - Tensão equivalente de *Von Mises*;
- σ_{ced} - Tensão de cedência do material;
- f - Coeficiente de segurança.

Outra abordagem que se tornou popular pela sua eficiência é chamada de SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), ou também conhecida como método da densidade, Equação (6). Foi introduzida por Bendsøe [38] e Mlejnek [39], nos finais da década de 1980, relacionando a densidade com as propriedades do material, e que é dada por [37]:

$$K(\rho) = \rho^p K^0, \rho > 1 \quad (6)$$

onde:

- p - Exponente de penalização (normalmente com valor entre 1 e 4);
- K^0 - Matriz de rigidez global para um certo material isotrópico.

Assim, esta visa encontrar uma distribuição de densidade ρ , onde é imposta uma restrição ao volume máximo de material obtido, sendo este definido como uma percentagem do volume inicial, representado na Equação (7) [37], com o objetivo de

alcançar a máxima rigidez. Este tipo de abordagem é também designada de “fração de massa”.

$$\begin{aligned} F^T u(\rho), \rho &\in [0,1] \\ K(\rho)u(\rho) &= F \\ \int_{\Omega} \rho &\leq V \end{aligned} \quad (7)$$

onde:

F - Vetor global de forças;

Ω - Domínio de material.

Uma história mais aprofundada sobre o aparecimento e desenvolvimento da OT pode ser encontrada em [40] [41].

Através da OT, pretende-se encontrar o valor ideal para uma variável dentro das restrições do problema. Uma vez que o algoritmo tenha encontrado a densidade adequada, o passo seguinte é melhorar a forma obtida (Figura 15), ou se necessário, dividi-la em várias peças. Estes métodos de otimização são predominantemente úteis para as peças individuais, pois para conjuntos complexos, os resultados obtidos requerem uma maior interpretação e cuidado [35], [36].



Figura 15 - Exemplo resumido do processo de OT. Adaptado de [42].

A qualidade da solução obtida pela OT é outra variável do projeto e pode ser ajustada através do refinamento da malha. Quanto mais refinada a malha, mais precisa a distribuição do material na solução. Uma malha grosseira dará soluções que não definem a distribuição ideal de material. Mesmo que a topologia da solução não seja muito diferente de uma obtida com a malha mais refinada, isso afetará a qualidade superficial da solução. Isto pode ser comparado com a resolução de um ecrã, pois é como olhar para a mesma imagem, mas com resoluções diferentes. Quanto mais refinada for a malha, melhor será a qualidade da imagem obtida. Na Figura 16, é visível a influência do refinamento de malha na solução OT [41], [43], [44].

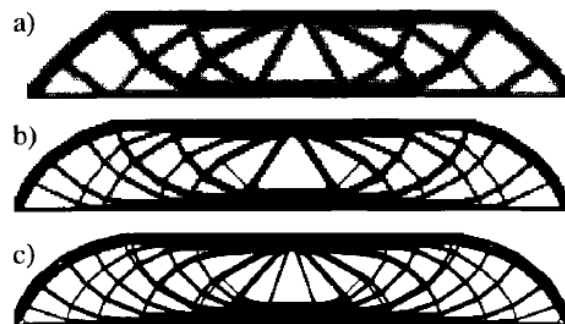


Figura 16 - Influência do refinamento da malha. a) 2700, b) 4800 e c) 17200 elementos [41].

2.4 Combinação entre FA e OT

O uso combinado de FA e OT, é algo bastante comum em indústrias como a aeroespacial ou automóvel [45]. A FA está a ganhar terreno como alternativa aos métodos de fabricação tradicionais, porque esta oferece, entre outros benefícios, vantagens significativas em termos de redução de peso. A FA torna possível a produção de componentes leves, não deixando de lhes associar também rigidez. A indústria aeroespacial foi pioneira no uso de FA, e agora outros setores como a indústria automóvel, estão também cada vez mais a usufruir desta tecnologia. A FA ajuda a atingir objetivos de criação de peças com peso reduzido, mas sempre garantindo em simultâneo a eficiência do produto, e possibilitando ainda a realização de geometrias complexas [45]. Um exemplo de um produto inovador (Figura 17) fabricado com estes

dois métodos é o *APWorks Light Rider* da Airbus [45], sendo este o primeiro protótipo no mundo de um quadro de moto impresso por FA.



Figura 17 - *APWorks Light Rider*, projeto de combinação entre FA e OT. Adaptado de [45].

Este novo *design* só pode ser conseguido graças à OT e também devido à utilização de um novo material desenvolvido internamente pela *Airbus*. Este produto foi desenvolvido como um estudo para demonstrar as múltiplas capacidades e oportunidades que são oferecidas pela FA de metal [45].

Outro exemplo é demonstrado por Muir *et al.* em [46], onde otimiza uma dobradiça de uma aeronave, localizada na porta de saída principal. No seu artigo, é possível ver as vantagens da combinação destas duas tecnologias e também pontos que foram tidos em consideração no projeto.

2.5 Design para Fabricação Aditiva (DpFA)

O *Design* para Fabricação (DpF) é uma prática de conceção de peças e/ou produtos para reduzir o tempo de fabricação, dificuldades na montagem e custos [6]. Em termos simples, DpF não é mais que a utilização da engenharia na conceção de produtos, de forma a que os mesmo se tornem mais fáceis de fabricar. Esta técnica de engenharia não se concentra apenas no *design* de uma peça, mas também na forma como irá ser produzida. Alterar, por exemplo, o processo de fabrico de uma peça com vista a melhorar a facilidade de a produzir, pode reduzir substancialmente os seus custos de produção. Quando falamos em produtividade, existem vários aspetos a ter em consideração, pois não é apenas o processo de fabrico que afeta diretamente os custos. A geometria da peça, as tolerâncias dimensionais, o tipo de material de construção em

bruto, a necessidade de pré/pós-processamento afetam igualmente o custo das peças [47]. Atualmente, existem diversas orientações acerca de DpF relativamente aos diferentes processos de maquinagem, podendo ser encontrados exemplos nesse sentido na literatura [47].

O DpF especificamente para FA, ou seja, DpFA, numa primeira fase focou-se essencialmente em materiais poliméricos, mas com a evolução dos processos e também das tecnologias, surgiu a necessidade de desenvolver este conceito para os metais [19]. Muitos dos conceitos de DpFA transitaram dos polímeros para os metais, apesar dos esforços desenvolvidos neste sentido ainda estarem em crescimento [8]. A FA permite que os projetistas tenham muita liberdade durante o desenvolvimento dos seus projetos, mas como em qualquer outro processo de fabrico, as diferentes tecnologias de FA têm suas capacidades e suas limitações [8]. No entanto, isso também depende do processo específico de FA, como foi explicado anteriormente no ponto 0. Quem projeta deve ter um bom *background* sobre as capacidades do(s) processo(s) e/ou tecnologia(s) a utilizar, conhecimentos esses que devem abranger quais as espessuras mínimas, as tolerâncias ou até mesmo ângulos mínimos possíveis de cumprir, sendo estes apenas alguns exemplos. Outro ponto importante a não esquecer é que, com metais a junção de diferentes materiais, surgem diferentes propriedades, contudo, os valores dos parâmetros tornam-se mais difíceis de ajustar. Como foi referido também em 2.1.2, para cada processo de FA é necessário ajustar valores, tais como, a potência da energia térmica, velocidade de varrimento, espessura da camada e espaçamento entre passagens, pois necessitam ser definitivamente ajustadas para obtenção de peças com qualidade [48].

Para usufruir realmente dos benefícios oferecidos pela FA, é necessário identificar componentes isolados, ou conjuntos em que os benefícios da produção através da FA acrescentem mais valor para o cliente. As empresas desenvolvem continuamente os seus produtos, para manter ou ganhar competitividade no mercado. O objetivo por trás das melhorias do produto, pode variar imenso.

Apesar das diversas oportunidades oferecidas pela FA, nem todas os componentes de um conjunto são adequados para este método de produção, ou melhor, nem todas têm

o mesmo potencial para uma melhoria geral do conjunto. É importante proceder a uma análise para identificar quais os componentes em que a mudança na tecnologia de fabrico oferece mais-valias para o desempenho do sistema. Para ajudar nesse sentido, foram identificados quatro critérios principais de seleção, que podem ser aplicados para auxiliar a selecionar componentes para um novo projeto e, deste modo, explorar completamente as capacidades e liberdades de *design* da FA [49].

O primeiro ponto passa pela identificação de componentes que podem ser compiladas de forma a obter benefícios na redução do número de peças. Deste modo, há menos interfaces entre as peças, o que causa também um menor tempo de montagem. É importante lembrar que, para obter um bom resultado, as peças selecionadas devem ser estáticas. Muitas vezes, o que acontece é que diversas peças existem para se completarem, ou mesmo para evitar a complexidade de uma só peça, devido a posteriores restrições de fabricação [49].

O segundo é a personalização, que hoje em dia é cada vez mais procurada, de forma a atender às necessidades e desejos dos diferentes clientes e ganhar vantagens sobre a concorrência. Contudo, a personalização causa variações na produção. Para uma produção rentável, o produto deve conter o máximo possível de componentes normalizados, os quais devem ser divididos em dois grupos: as peças normalizadas e as personalizadas, de tal modo que a fabricação de componentes normalizados possa ser feita em grande série, através de processos convencionais, enquanto os componentes personalizados são produzidos em pequenos lotes por FA. Com isto é obtido um equilíbrio de custo durante a produção, para que seja possível obter um produto final com custos razoáveis [49].

O terceiro é a criação de *designs* de componentes leves e resistentes, proporciona aplicações dinâmicas. Um exemplo disto é a formação de estrutura no formato treliça, onde o peso é reduzido e o desempenho do produto é mantido. Contudo, nas zonas de maior esforço, é utilizado material sólido [49]. A Figura 18 representa um exemplo desse tipo de construção.

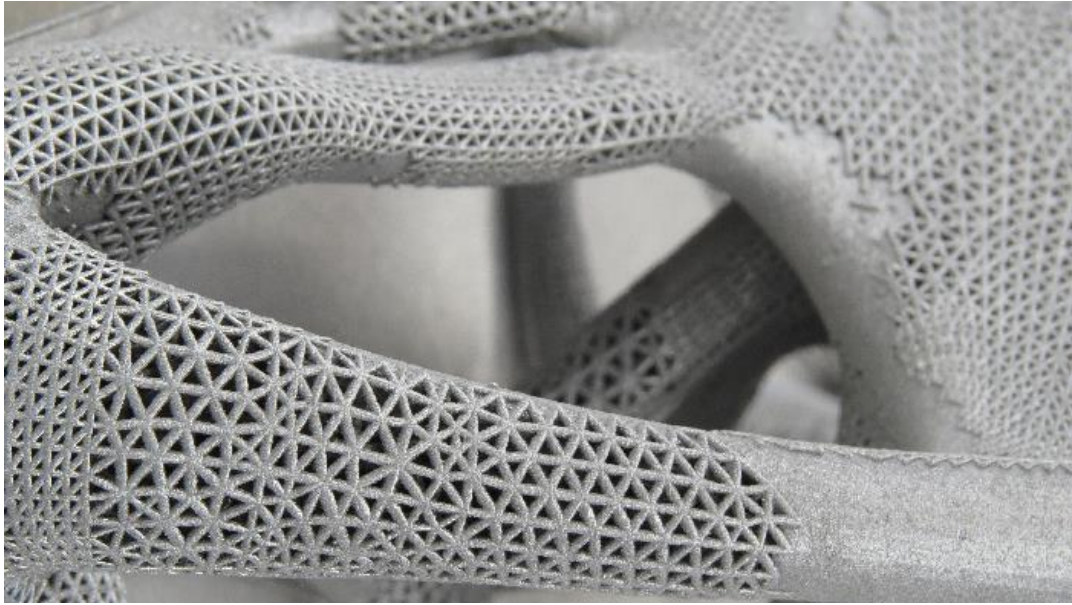


Figura 18 - Exemplo de construção intercalada entre estrutura treliçada e material sólido [31].

A liberdade geométrica de *design* da FA permite que o material apenas seja disposto onde é necessário, para uma determinada função, por exemplo, suportar uma carga. Isso aumenta a complexidade, mas reduz o material e o peso. Uma maior complexidade leva a uma menor quantidade, por isso, o tempo de fabricação é menor e, subsequentemente, os custos também. Em comparação com a fabricação convencional, onde o inverso acontece, uma maior complexidade leva a custos mais altos. Para ser possível uma otimização de peso, é requerido conhecimento sobre os esforços a que esta será solicitada [49].

E por fim, o quarto critério é sobre a criação de um novo *design* mais eficiente, ou seja, pretende-se também melhorar a eficiência do produto. Isso pode ser conseguido se o *design* implementado mantiver ou até mesmo aumentar o desempenho do componente, e em simultâneo as perdas (custos) diminuïrem. Por exemplo, um componente que tenha cinco pontos de fixação, caso seja possível remover uma dessas fixações, o mesmo torna-se mais eficiente, pois realizará a mesma função, mas com menos recursos.

Estes são os pontos que devem ser selecionados e analisados para um *redesign*. Estes quatro critérios ajudam a identificar peças para serem fabricadas por FA. A melhor maneira de demonstrar o potencial da FA, é através de exemplos bem-sucedidos [49].

No ponto 2.4 foram mencionados dois casos que demonstram as potencialidades deste processo. Algumas das considerações importantes a ter em mente para um projeto bem-sucedido, seguindo os critérios DpFA para peças metálicas, são [50]:

- Melhorar a qualidade do acabamento superficial;
- Minimizar os suportes ou apoios;
- Evitar a distorção do componente.

A rugosidade média aritmética superficial (R_a), ou acabamento superficial, é definido em grande parte pela energia térmica, pelo tamanho de grão e pela espessura da camada. O poder da energia térmica funde o pó, solidificando posteriormente. Contudo se o espaçamento entre passagens for demasiado, existirá uma zona onde é propício o aparecimento de poros, ou de grãos parcialmente sintetizados, o que irá causar alguma rugosidade indesejada. Camadas mais finas associadas a baixas granulometrias de pó, tendem a melhorar o acabamento superficial [50].

A minimização, ou até mesmo eliminação dos suportes, pode ser feita em certos casos. Mas, por exemplo, quando se trata de orifícios ou furos no eixo horizontal, tendo eles um diâmetro superior a 10 mm (varia dependendo do material), por norma necessitam de suportes, para que mantenham a forma redonda até ao final da fabricação da peça.

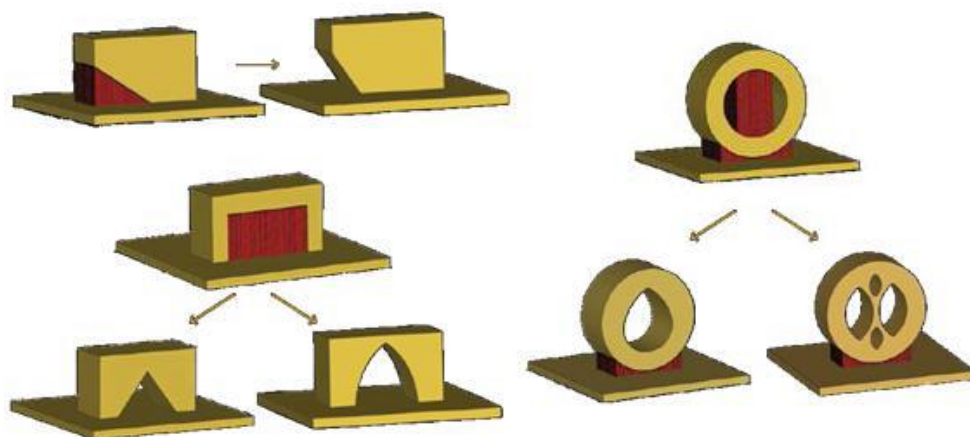


Figura 19 - Exemplo de alterações no projeto para evitar suportes. Adaptado de [4].

Contudo é possível reduzir ou eliminar a necessidade de suportes se a peça for redesenhada, e assim alterar os ângulos de inclinação ou o formato dos furos. A orientação é outra forma de evitar suportes adicionais, embora isto possa influenciar os custos de projeto, que precisam ser ponderados, em termos de custo de desenvolvimento-benefício. Superfícies inclinadas suspensas, se tiverem um ângulo demasiado baixo e caso sejam fabricadas sem suportes, pode haver lugar a deformações durante o fabrico. Por vezes, uma reorientação da peça pode simplesmente evitar os suportes, ou então, pode apenas transitá-los para outro local. Assim uma parte fundamental do processo DpFA é avaliar como construir a peça com o mínimo de suportes [50].

A densidade de energia pode levar à inclusão de tensões residuais nas peças, principalmente em longas secções transversais, ou em secções de espessura considerável. Estas tensões podem até mesmo criar fissuras nas peças. De uma forma geral, num projeto de FA, é conveniente evitar as secções muito espessas, especialmente em materiais com alto ponto de fusão. Sempre que possível, deverá utilizar-se estruturas em treliça, visto que ajudam a reduzir as tensões, o peso e também auxiliam na dissipação de calor, evitando assim deformações [50].

2.6 Critérios para Seleção de Processo de Fabrico

Existem diversas formas de escolher um processo de fabricação, sendo que uma opção é a utilização de modelos de apoio à decisão. Estes modelos têm vindo a ser cada vez mais utilizados em problemas de engenharia. As opções de decisão disponíveis são as combinações entre material e processo de FA. Deste modo, os atributos são classificados segundo a sua importância, usando valores simples para os classificar. As opções são classificadas e ordenadas usando uma expressão de soma ponderada [6].

A primeira etapa passa pela identificação dos atributos para posterior avaliação. Por exemplo, precisão, custo, tempo de produção e resistência à tração, são alguns atributos comuns. É importante definir as escalas, pois existem propósitos diferentes. Dois exemplos de escalas de proporção são: os custos são medidos em euros, sendo que estes devem ser minimizados, e a resistência à tração é medida em MPa, devendo esta

ser maximizada. Por outro lado, as escalas de intervalo são medidas em números inteiros [6].

A capacidade de complexidade é um atributo que pode ser medido usando este tipo de escala. Os intervalos podem variar, mas normalmente são entre 1 e 10, onde 10 significa, neste caso, a maior complexidade. Após estarem definidas as escalas, é necessário definir pesos ou importâncias para cada atributo. Para normalizar as classificações, são utilizadas duas equações para que sejam assumidos valores entre 0 e 1 [6]. Então, para os atributos que se pretende que sejam maximizados, é utilizada a Equação (8) [6], e para os que se pretende que sejam minimizados é, utilizada a Equação (9) [6].

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{ij,min}}{a_{ij,max} - a_{ij,min}} \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{a_{ij,max} - a_{ij}}{a_{ij,max} - a_{ij,min}} \quad (9)$$

Depois de serem avaliados todos os atributos, é hora de calcular o índice de mérito (M_j) total, que é dado pela Equação (10) [6]:

$$M_j = \sum_{i=1} l_i r_{ij} \quad (10)$$

É importante notar que neste tipo de modelos não existe apenas uma única solução para cada problema, pois, dependendo de cada pessoa, as importâncias serão diferentes e, consequentemente, o resultado final também [6].

Em resumo:

- Primeiro devemos reunir as alternativas, ou seja, os processos de FA e materiais;
- Em seguida, definir os atributos de avaliação, criar escalas e determinar importâncias;
- Avaliar cada alternativa contra cada atributo;
- Por fim, fazer a classificação de todos os processos, do mais para o menos promissor.

DESENVOLVIMENTO

3.1 LINHAS DE ORIENTAÇÃO DE PROJETO

3.1.1 SELEÇÃO DE PROCESSO DE FABRICO

3.2 COMPONENTE INICIAL

3.3 REQUISITOS INICIAIS A MANTER

3.4 ANÁLISE MEF DO COMPONENTE INICIAL

3.5 OTIMIZAÇÃO DO COMPONENTE INICIAL COM VISTA À FABRICAÇÃO ADITIVA

3.6 REDESIGN DO COMPONENTE OTIMIZADO

3.7 ANÁLISE MEF DOS COMPONENTES OTIMIZADOS

3.8 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.9 PREPARAÇÃO DO COMPONENTE OTIMIZADO PARA PRODUÇÃO

3.10 FABRICAÇÃO ADITIVA (FA) VS FABRICAÇÃO SUBTRATIVA (FS)

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Linhas de Orientação de Projeto

Durante a realização deste capítulo, foram sentidas algumas dificuldades ao nível das etapas a seguir e correta sequência das mesmas. Perante isto, foram desenvolvidas as linhas de orientação de projeto que podem ser vistas na Figura 20, seguidamente com a descrição de cada uma das etapas.

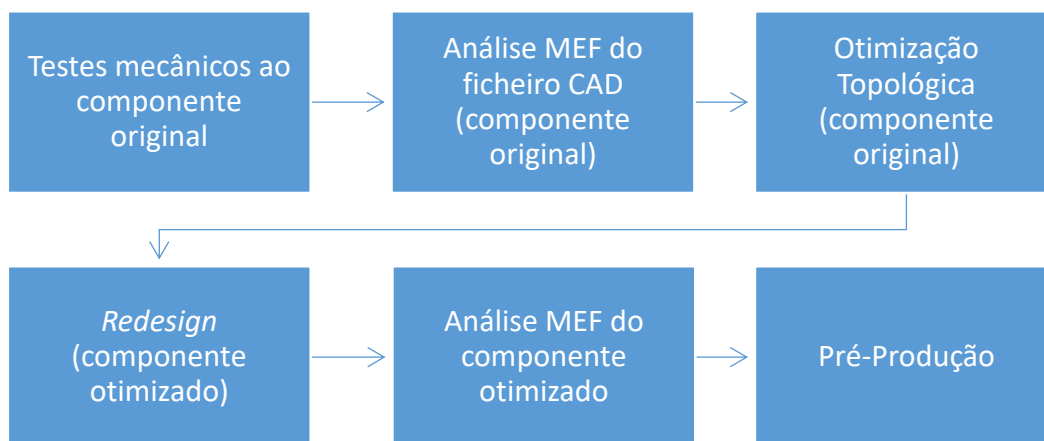


Figura 20 - Linhas de orientação de projeto.

O primeiro passo foi analisar através de testes mecânicos o componente original, a fim de estabelecer os valores de tensão máxima admissível, para servirem de referência ao próximo passo.

Após obtidos os valores das tensões máximas, foi necessário encontrar uma malha que vá de encontro aos resultados conseguidos. Assim, pelo MEF serão efetuados iterativamente ensaios, até que os valores sejam os mais aproximados possível aos obtidos na etapa anterior. Desta forma, foi também necessário ajustar iterativamente a malha. Contudo, é importante obter-se um rácio razoável entre os valores obtidos e o esforço computacional.

O passo que se seguiu foi a OT, que também é um processo iterativo. A otimização necessita que sejam definidos vários aspetos inicialmente. Começa-se pelas variáveis e restrições de projeto, em seguida definem-se o(s) objetivo(s) pretendido(s), como por exemplo, a rigidez máxima ou peso mínimo.

Depois de concluída a otimização segundo o(s) objetivo(s), foi importante definir-se uma estratégia de abordagem para interpretação e *redesign* da solução obtida.

O *redesign* também foi considerado uma etapa iterativa devido à necessidade de validação através de análise segundo o MEF. Por norma, é necessário corrigir algumas regiões para reduzir os valores das tensões, e/ou também eliminar regiões de concentração de tensões.

Após termos o componente com o *design* final, o mesmo está pronto para ser produzido, contudo, neste ponto (pré-produção) é importante selecionar um processo de produção adequado. A necessidade de estruturas de suporte para auxílio à fabricação, deve ser verificada na pré-produção.

A partir da pré-produção, existem outros trabalhos que não estão incluídos nesta dissertação, mas que não deixarão de ser enumerados, para serem considerados em futuros trabalhos nomeadamente:

- Testes de viabilidade de geometrias;
- Produção do componente;
- Ensaios mecânicos para validar o MEF;
- Pós-processamento.

3.1.1 Seleção de Processo de Fabrico

Após estruturação das etapas necessárias para seleção de um processo de fabrico em 2.6, procedeu-se à escolha das alternativas e dos atributos primordiais. As opções escolhidas foram as seguintes:

Processos - DMLS;

- EBM;

- SLM;

- SLS.

Atributos - Tempo de produção (horas);

- Custo por peça (euros);

- Complexidade geométrica (intervalo 1-10);

- Densidade da peça (percentagem).

Seguidamente, reuniram-se os valores de cada um dos atributos, para cada uma das alternativas de processo. Assim, podem ser vistos na Tabela 2 [6] os respetivos valores (estimados para uma peça com 200 g) bem como as importâncias atribuídas. A densidade da peça fabricada foi o principal fator para escolha destas alternativas, pois é pretendido obter peças estruturalmente resistentes.

Tabela 2 - Avaliação das alternativas e respetivos atributos. Adaptado de [6].

	Processo	Tempo de produção	Custo por peça	Complexidade geométrica	Densidade
Alternativas	DMLS	1,5 – 30	130 – 500	7 – 10	100
	EBM	0,5 – 5	60 – 300	4 – 6	100
	SLM	1,5 – 25	180 – 900	7 – 10	100
	SLS	0,30 - 2	30- 170	4 – 6	100
Escalas	Valor min.	0,25	20	1	95
	Valor max.	48	550	10	100
	Preferência	Baixo	Baixo	Alto	Alto
	Unidade	Horas	€	Intervalo	%
Importâncias		0,294	0,294	0,176	0,236

A determinação do processo mais adequado é conseguida após calcular os índices de mérito e classifica-los ordenadamente, como pode ser visto na Tabela 3. Contudo esta classificação é obtida em função das importâncias dadas, que variam dependendo de quem está a executar a escolha.

Tabela 3 - Classificação final dos processos.

Processo	Índice de Mérito	Classificação
SLM	0,837	1
DMLS	0,792	2
EBM	0,689	3
SLS	0,663	4

Neste caso, o processo vencedor segundo as importâncias dadas a cada um dos atributos foi o SLM. Contudo, uma outra opção poderia ser DMLS, visto que ficou com um índice também muito próximo da classificação de topo.

3.2 Componente Inicial

A indústria aeronáutica utiliza materiais leves para a fabricação da generalidade dos seus componentes [51]. As ligas de alumínio (Al) são muito utilizadas nesta indústria. Dentro da vasta gama disponível, destacam-se as ligas da série 2000 e da série 7000, devido à sua boa resistência mecânica e um bom desempenho à fadiga. O componente em estudo serve de apoio à porta de uma aeronave, que durante o seu tempo útil está sujeito a fadiga, com a indução de tensões à compressão quando a porta está fechada, e à tração quando aberta.

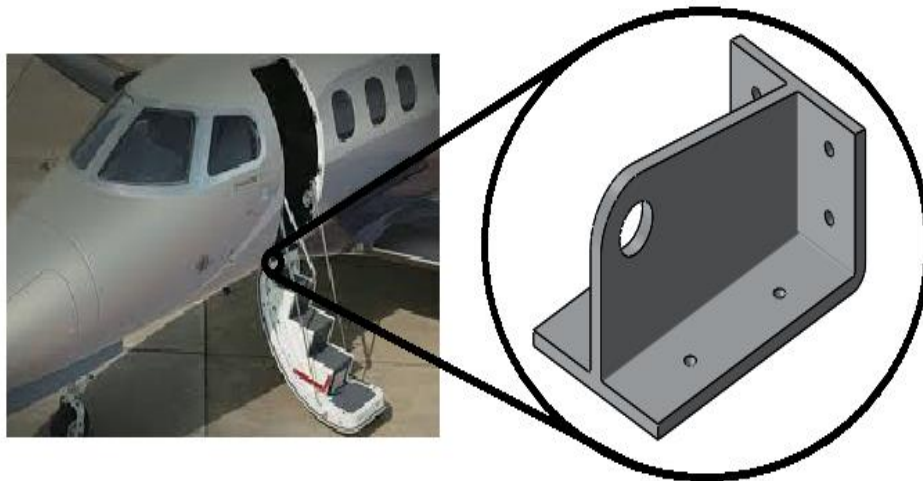


Figura 21 - Imagem representativa da aplicação do componente em estudo.

O componente inicial é fabricado na liga de Alumino 7075-T6 [51], cujas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 4 [52].

Tabela 4 - Propriedade mecânicas do Alumino 7075-T6 [52].

Material	E (GPa)	G (GPa)	σ_{ced} (MPa)	σ_{rot} (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Al 7075-T6511	71,7	26,9	503	572	0,33	2810

3.3 Requisitos Iniciais a Manter

O componente inicial, foi testado mecanicamente para dois casos de carga estática. Durante esses ensaios foram aplicados extensômetros de roseta para obter os valores das tensões máximas instaladas. Na Tabela 5 podem ser vistos os valores das forças aplicadas, bem como os valores obtidos para cada um dos casos (ensaio realizado à temperatura de 25° C, com uma velocidade de avanço de 1 mm/min). Esses valores serão usados como referência para o refinamento da malha que irá ser efetuado em 3.4.

Tabela 5 - Casos de estudo das forças aplicadas no componente original, para obter as tensões máximas instaladas.

Casos de estudo	Forças (kN)			Tensões (MPa)
	F_x	F_y	F_z	σ_{max} (Von Mises)
Caso de Estudo 1	-4,5	0	2,5	113,27
Caso de Estudo 2	4,0	0	3,0	436,73

Este componente (Figura 22) é fixo à estrutura da aeronave através de oito furos com 4,1 mm de diâmetro, onde são colocados rebites estruturais HST315. Já o furo maior (diâmetro 16 mm) funciona como olhal, ou seja, é nele que são aplicadas as forças.

Então definiu-se as restrições e as variáveis de projeto. Os aspectos que terão de ser mantidos (objetivos) após a otimização são:

- Diâmetro dos furos;
- Posicionamento dos furos (para evitar alterações na estrutura);
- As tensões instaladas (se possível até reduzir).

Desta forma, os requisitos utilizados como variáveis são:

- Geometria (*design*);
- Volume do componente;
- Peso do componente;

- Material do componente.

Na Figura 22 está representado o componente inicial, onde é possível ver a azul as regiões que são restrições de projeto, e a verde as regiões variáveis. É ainda possível ver que existe um diâmetro ao redor dos furos tanto para os rebites como para o “olhal” que é também considerado como restrição de projeto. Isto fica a dever-se ao raio de segurança necessário para garantir a resistência do mesmo, que neste caso é dado pelo dobro do diâmetro do furo em questão [4].

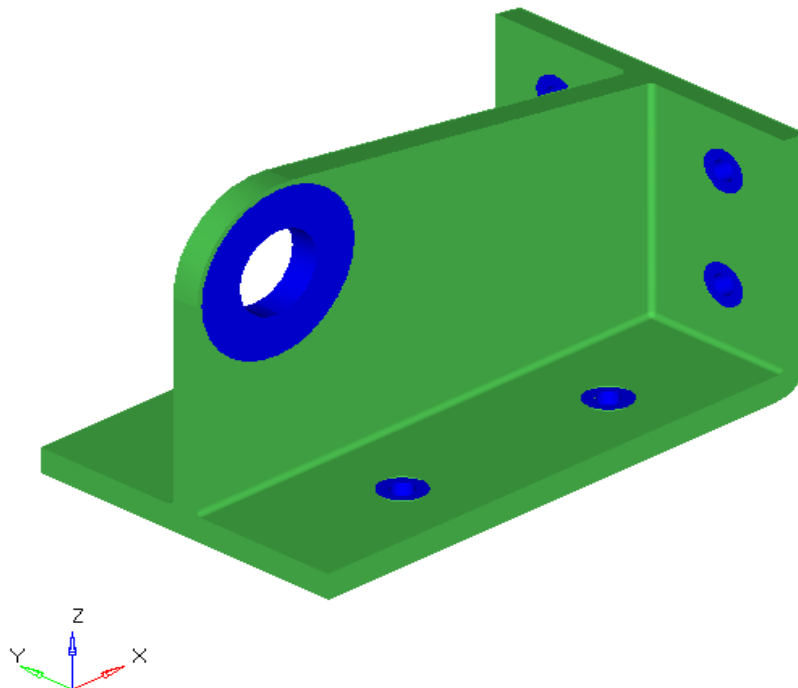


Figura 22 - Componente inicial.

3.4 Análise MEF do Componente Inicial

A análise através do MEF é um excelente método para simular casos reais de engenharia, contudo, é preciso ter cuidados acrescidos, pois este só apresenta resultados de forma correta, se a malha estiver devidamente definida. O número de elementos que uma malha pode conter, define o grau de precisão dos resultados. Então, para criar uma

situação o mais real possível, foram obtidas (através de ensaios mecânicos) as tensões que irão servir de referência. Deste modo, a malha terá de ser ajustada de forma a que os valores das tensões obtidas numericamente sejam muito próximas daquelas obtidas nos ensaios. Para isto, será efetuada uma análise de convergência, ou seja, um refinamento da malha iterativamente até os valores conseguidos pelo MEF sejam os desejados.

Foi definido inicialmente um valor aleatório da dimensão do elemento da malha. De seguida, foi analisado o componente original e obteve-se o primeiro valor das tensões instaladas. Seguidamente, foi incrementada iterativamente a redução da dimensão do elemento, até os objetivos serem atingidos.

Na Figura 23 está representado o componente original preparado para ser analisado. Nele podemos ver, a verde, a força (caso de estudo 2) aplicada no furo de maior diâmetro, a rosa, nos restantes furos os triângulos que representam as restrições de fixação com rebites, e ainda em todo o componente, a cinza, a malha inicialmente definida. A amarelo, no centro de cada um dos furos, estão representados os elementos de corpo rígido, que são apenas utilizados no *software* para servirem de apoio à aplicação das forças ou fixações.

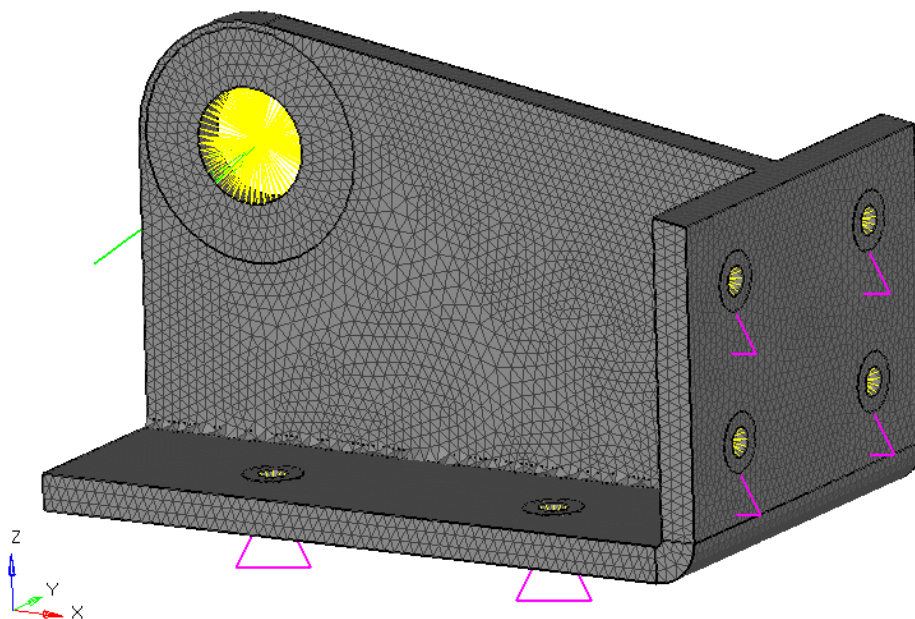


Figura 23 - Exemplo de aplicação de forças e fixações para análise FEM.

Para além de definir a malha, as forças e as fixações é também necessário definir o material do componente. Como referido em 3.3 o material pode ser alterado, contudo, durante a primeira fase as propriedades de material usadas foram as do componente original (liga Al 7075-T6).

A Figura 24 está representada a quantidade do número de elementos em função da sua dimensão. Existe uma enorme disparidade na quantidade de elementos e isso irá ser refletido posteriormente no valor das tensões obtidas. Apesar de, na Figura 24, estarem representadas malhas até uma dimensão de elemento de 0,15 mm, a análise de convergência efetuada para cada um dos casos de estudos utilizou somente até 0,4 mm. Isto deve-se ao resultado do esforço computacional envolvido, pois, verificou-se que o esforço computacional exigido para malhas de menor dimensão que a utilizada, era demasiado e o resultado obtido não era o desejado.

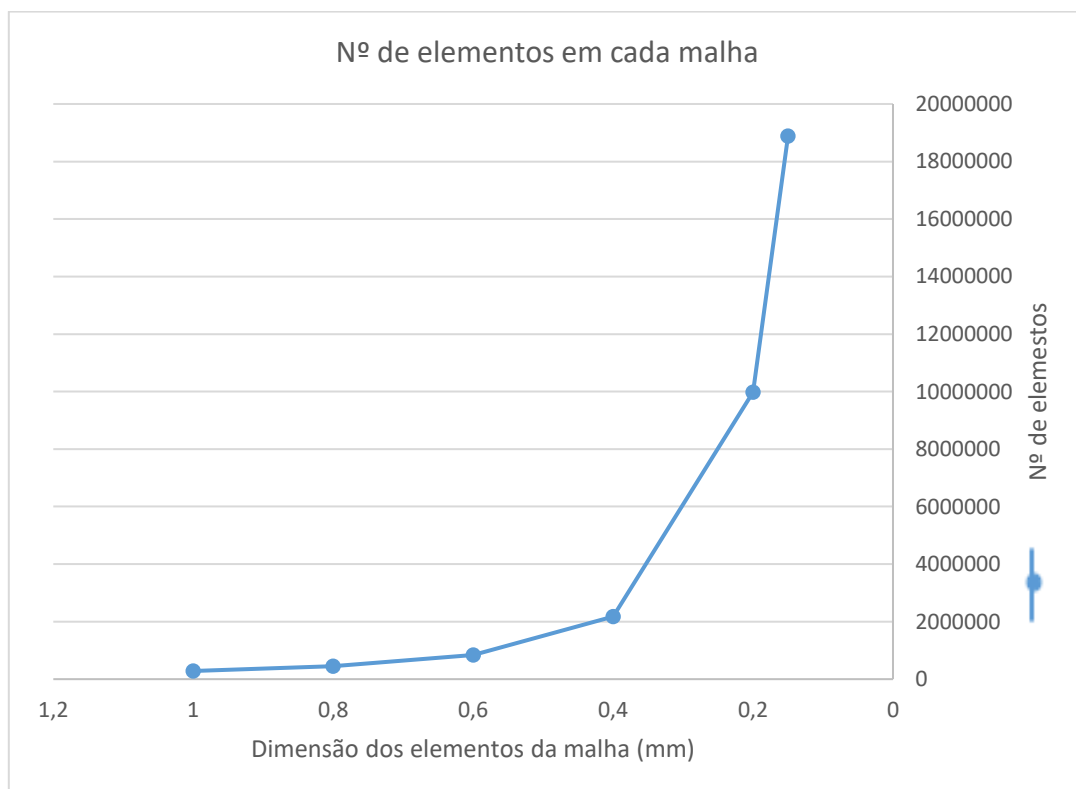


Figura 24 - Influência do tamanho da malha no número de elementos.

Na Tabela 6 estão representados os valores das tensões obtidas em cada uma das iterações efetuadas, segundo o caso 1 de forças aplicadas, presente na Tabela 5.

Tabela 6 - Valor das tensões obtidas durante a convergência da malha do componente original referente ao caso 1.

Iterações	Dimensão do elemento (mm)	σ_{max} (MPa)	Tensões de referência caso 1 (MPa)
1	1,0	91,74	113,27
2	0,80	100,12	
3	0,60	105,86	
4	0,40	112,83	

O valor das tensões na quarta iteração está realçado a verde devido a estar bastante próximo do valor de referência e desta forma, foi a malha selecionada para o caso 1. Na Tabela 7 estão representados os valores das tensões obtidas em cada uma das iterações efetuadas, segundo o caso 2 de forças aplicadas, presente na Tabela 5. Apesar dos valores de ambos os casos diferirem bastante, ambas as soluções irão ser estudadas. Como pode ser visto na Tabela 7, para este segundo caso, uma malha com dimensão de elemento 0,4 mm apresenta valores de tensões demasiado elevados quando comparados com os obtidos nos ensaios, estando estes identificados a vermelho devido a serem superiores à σ_{ced} do material em estudo. Tal como no caso anterior, está realçado a verde o valor das tensões na quarta iteração devido a estar bastante próximo do valor de referência e assim selecionada a malha para o caso 2.

Tabela 7 - Valor das tensões obtidas durante a convergência da malha do componente original referente ao caso 2.

Iterações	Dimensão do elemento (mm)	σ_{max} (MPa)	Tensões de referência caso 2 (MPa)
1	1,0	416,82	436,73
2	0,80	415,96	
3	0,60	441,21	
4	0,40	517,04	

Figura 25 ilustra o comportamento do valor máximo das tensões em função do número de elementos da malha. O caso de estudo 1 apresenta um comportamento praticamente constante relativamente ao valor das tensões máximas presentes em cada dimensão de malha. Contudo, para o caso de estudo 2 os valores diferem bastante, com uma tendência de convergência para o infinito e, portanto, quanto mais refinada a malha, maior será o valor das tensões máximas.

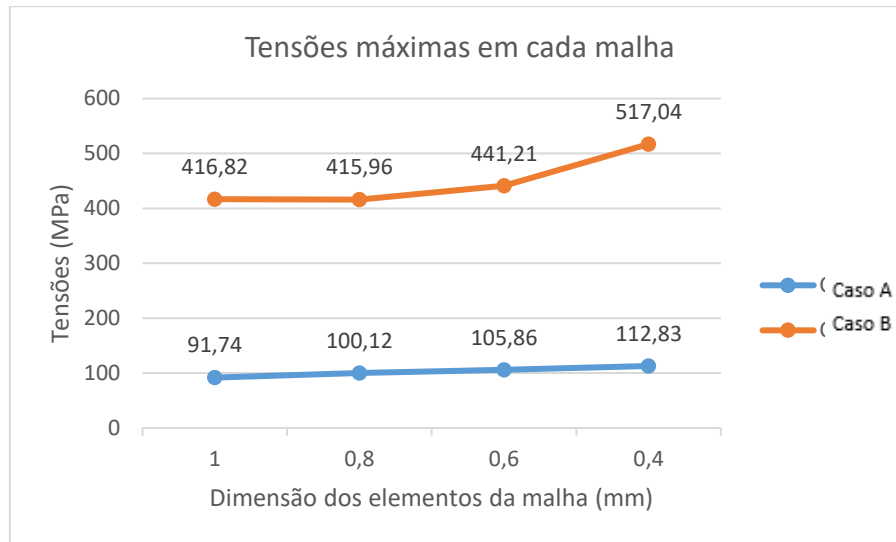


Figura 25 - Influência do número de elementos da malha no valor das tensões obtidas.

A Figura 26 representa um exemplo dos resultados obtidos numa análise MEF. Os resultados obtidos estão representados numa escala de valores e também de cores.

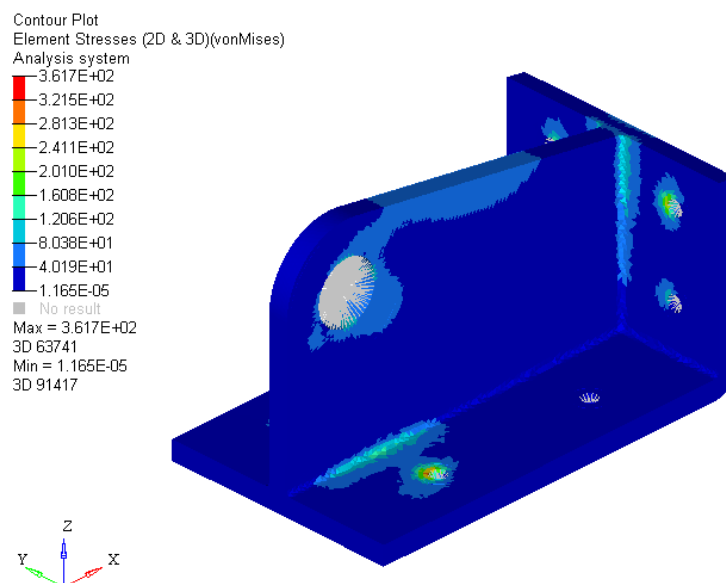


Figura 26 - Exemplo do resultado obtido de uma análise MEF.

Nessa escala podem ser vistos os valores das tensões relacionadas a diferentes cores, e assim, com o auxílio, das cores é possível perceber quais as zonas mais críticas na peça.

3.5 Otimização do Componente Inicial com vista à Fabricação Aditiva

Para efetuar a otimização de um componente, é necessário definir qual o objetivo da mesma. Neste caso, o objetivo é obter o mínimo peso, ou seja, reduzir o peso, mas mantendo, ou até, se possível, reduzindo os valores das tensões obtidos nos testes mecânicos do componente original (Tabela 5).

Desta forma definiu-se o seguinte:

- Obter uma redução até 65% de volume de material;
- Manter a rigidez para suportar as forças aplicadas nos casos de estudo 1 e 2.

O *software* analisa as partes do componente de menor importância para a sua resistência a determinada solicitação, demonstra os caminhos de carga e executa uma remoção de material até ao objetivo definido pelo utilizador, que neste caso, era obter uma peça com apenas 35% do volume de material inicial. Contudo, como pode ser visto na Figura 27, a solução proposta pelo *software* não é final, é apenas uma orientação para o utilizador redesenhar o componente.

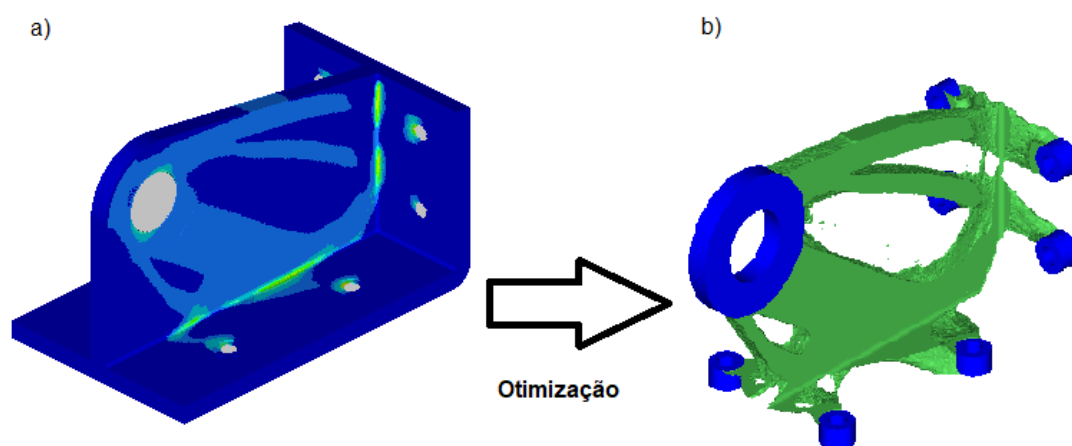


Figura 27 - Otimização para o caso de estudo 1: a) caminhos de cargas. b) solução de otimização.

Como pode ser observado na Figura 27 e Figura 28 houve uma significativa redução de material em ambos os casos, contudo ambas as soluções necessitam ser redesenhadas

para se obter um *design* final. Devido à diferente orientação das forças, os resultados obtidos também são distintos.

A Figura 28 lustra a proposta de otimização para o caso de estudo 2. Esta solução implica a redução de dois pontos de fixação, no entanto, ambas as soluções irão ser estudadas e será importante obter um *design* final único, que complemente ambos os casos de carga.

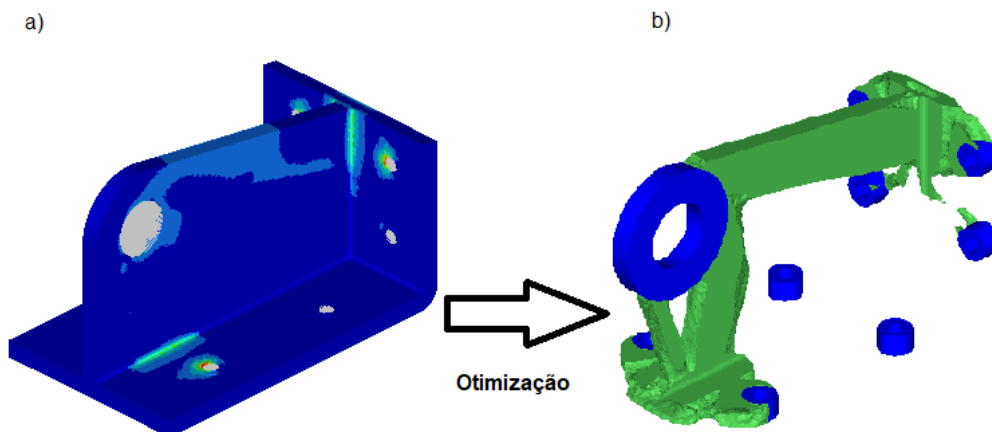


Figura 28 - Otimização para o caso de estudo 2: a) caminhos de cargas. b) solução de otimização.

3.6 Redesign do Componente Otimizado

Após conseguida a otimização, é necessário efetuar um *redesign* no componente otimizado, pois este, apresenta formatos orgânicos como pode ser visto da Figura 29.

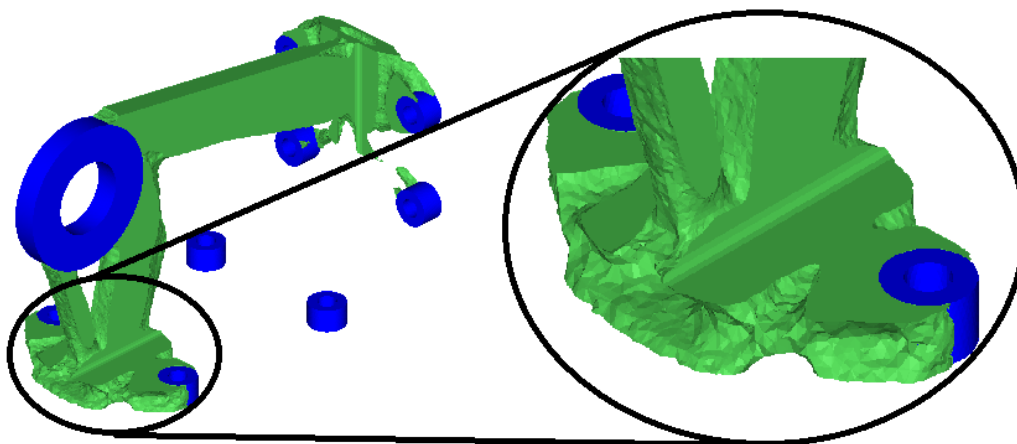


Figura 29 - Exemplo de formato orgânico obtido pela OT.

Apesar de esses formatos não apresentarem um problema de fabricação para o processo, pretende-se um formato mais liso para não aumentar o tempo de fabricação com pequenos detalhes não significantes.

Para obter o novo *design*, em ambos os casos, foi aplicado a abordagem de *redesign* clássica, que consiste em efetuar cortes e boleados no componente original até obter um formato desejado (o mais idêntico possível ao apresentado pela solução de OT).

Na Figura 30 é possível ver em resumo a evolução de *design* para caso de estudo 1. Este primeiro *redesign* pode não ser o final, pois seguidamente terá de ser analisado para verificar se cumpre os requisitos das solicitações impostas.

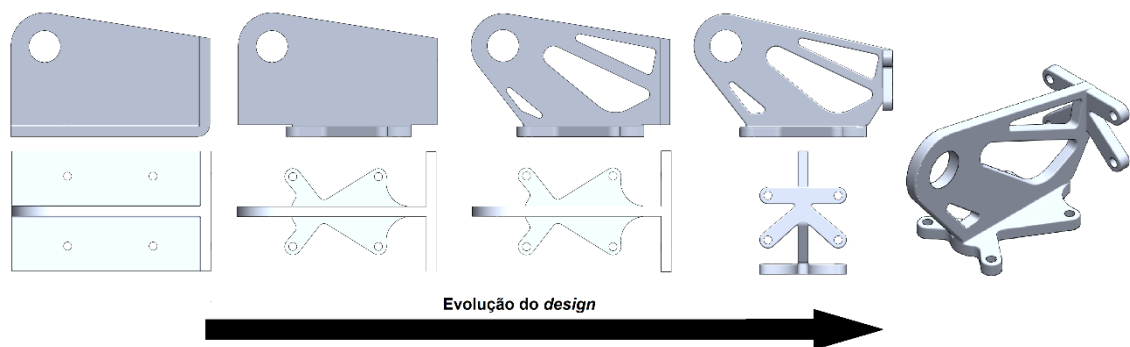


Figura 30 - Evolução do *design* para o componente A obtido pelo caso de estudo 1.

A Figura 31 ilustra resumidamente a evolução de *design* para caso de estudo 2. Como é pretendido um *design* final único, ambas as geometrias serão analisadas para os dois casos de estudo, pois, é importante que suportem os esforços em ambos os casos.

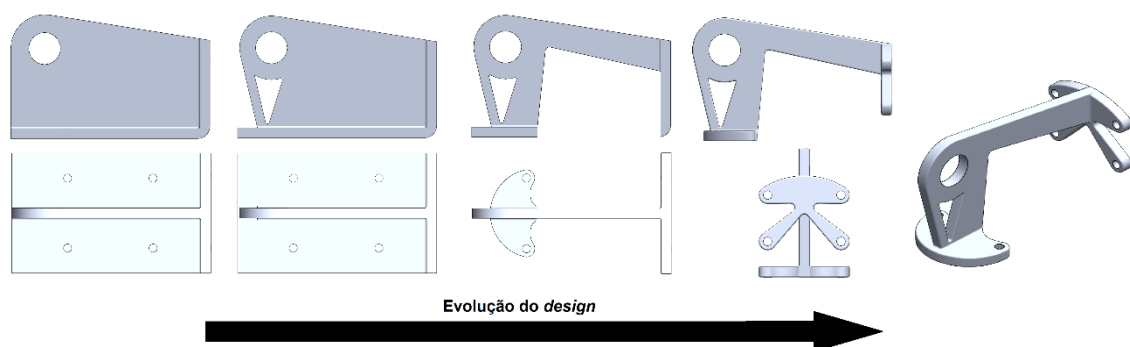


Figura 31 - Evolução do *design* para o componente B obtido pelo caso de estudo 2.

3.7 Análise MEF dos Componentes Otimizados

O componente original era solicitado em dois casos de carga diferentes, e como tal, apesar da mudança de *design*, é importante a verificar esses mesmos dois casos em cada um dos componentes (A e B) obtidos anteriormente.

Para o componente A, foi verificado, para o caso de estudo 1 um ligeiro aumento do valor das tensões, contudo, para o caso de estudo 2 o valor obtido foi demasiado elevado, sendo aproximadamente duas vezes maior que a tensão de cedência do material. A Figura 32 ilustra a análise efetuada para ambos os casos de carga.

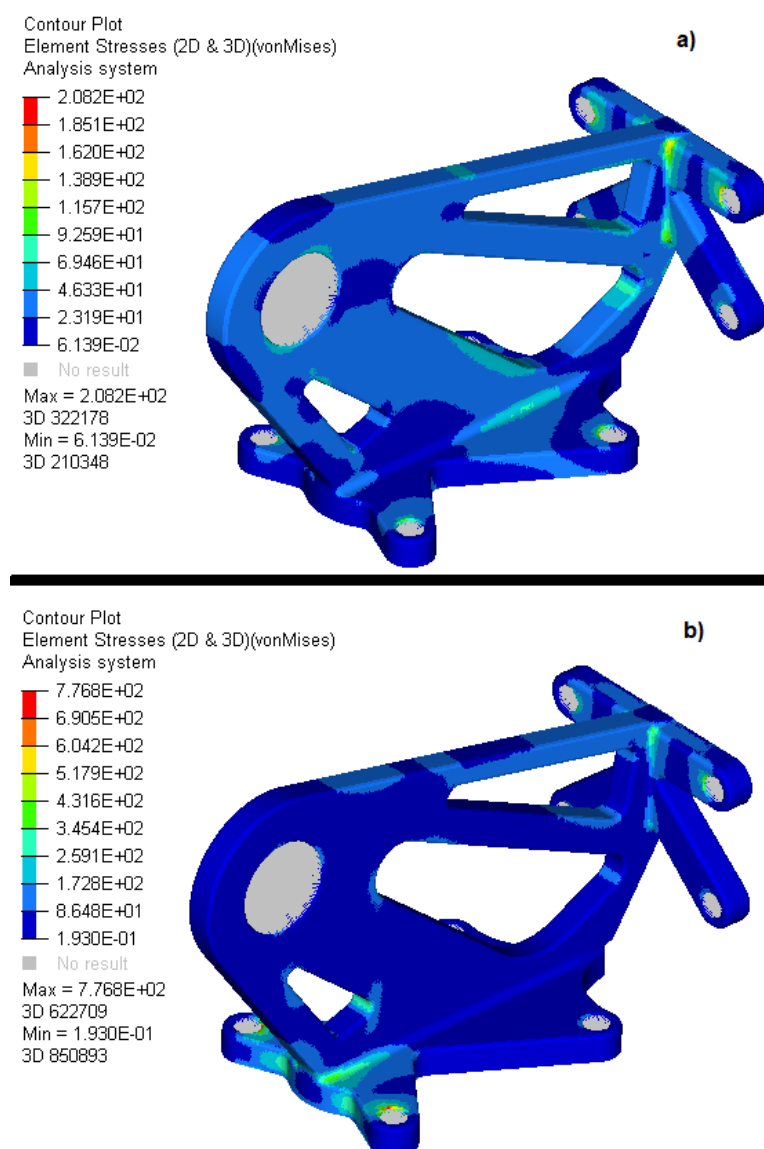


Figura 32 - Resultado da análise do componente A: a) caso de estudo 1. b) caso de estudo 2.

Já para o componente B, acontece o inverso, verificou-se um ligeiro aumento do valor das tensões no caso de estudo 2, contudo, o valor das no caso de estudo 1 é demasiado alto. Isto deve-se a cada um destes componente ter sido projetado para cada um dos casos de carga, então, no caso de carga oposto não têm a resistência necessária. Na Figura 33 pode ser visto a análise efetuada para o componente B.

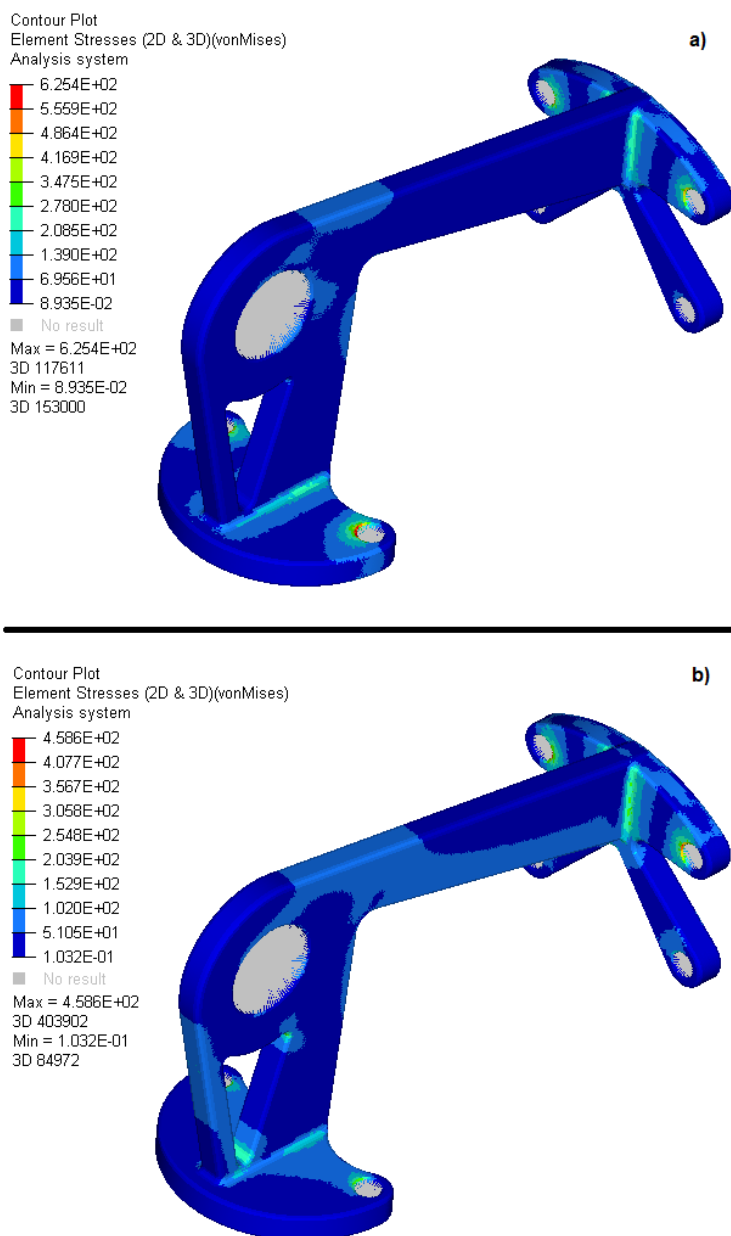


Figura 33 – Resultado da análise do componente B: a) caso de estudo 1. b) caso de estudo 2.

Como após a análise de esforços dos componentes A e B, obtidos através do redesign nos casos 1 e 2, respetivamente, verificou-se que nenhum deles cumpria os requisitos em ambos os casos. Então, surgiu a necessidade da criação de um design que

complementasse ambos os casos. Por este facto, recorreu-se à construção de um novo design, o componente C, que consiste praticamente numa junção do componente A componente B. Este segundo foi a base principal para o início do desenvolvimento, contudo, teve-se em consideração a importância de manter os oito furos para fixação tal como estava presente no componente A. A evolução do design para o componente C pode ser vista resumidamente na Figura 34.

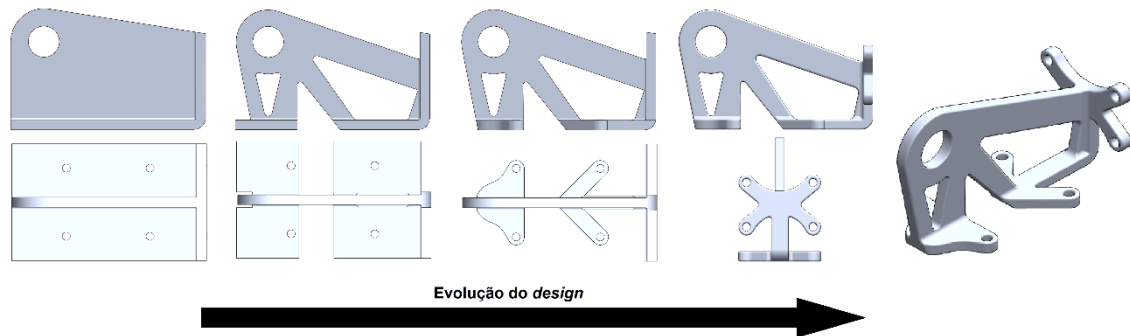


Figura 34 - Evolução do *design* para o componente A obtido pela junção dos casos de estudo 1 e 2.

Este componente apesar de ter sido projetado para ambos os casos de carga terá de ser testado para provar que verifica os mesmos. A Figura 35, mostra que após análise o componente C é válido para ambos os casos, apesar do valor das tensões diminuírem no caso de estudo 2, para o caso de estudo 1, essas tensões aumentam ligeiramente, contudo, não é preocupante devido a serem valores facilmente suportáveis pela estrutura pois apresentam valores bastante abaixo da tensão de cedência do material.

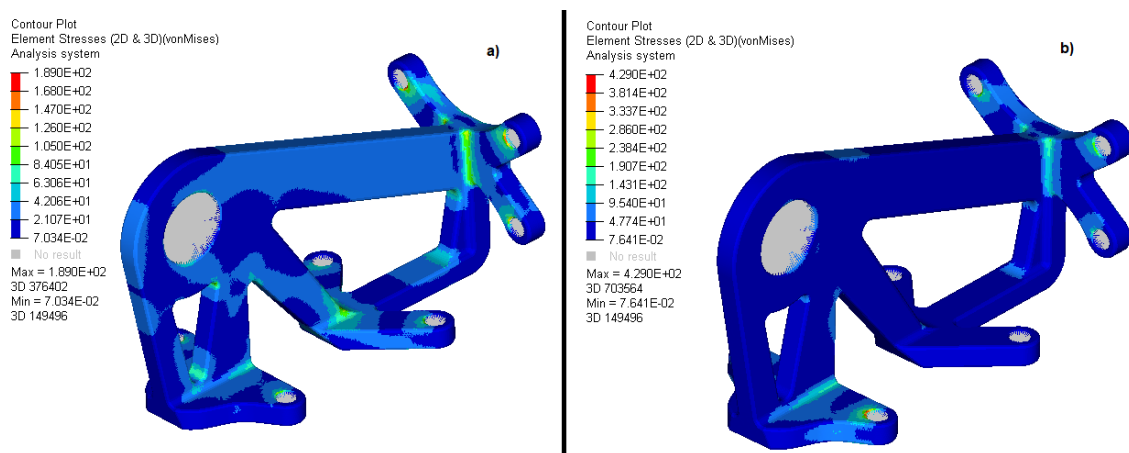


Figura 35 - Resultado da análise do componente C: a) caso de estudo 1. b) caso de estudo 2.

Como o componente C foi validado numericamente, o mesmo pode ser visto na Figura 36. Este novo *design* (componente C), está sobreposto ao componente original e verifica-se que preenche os requisitos do mesmo.

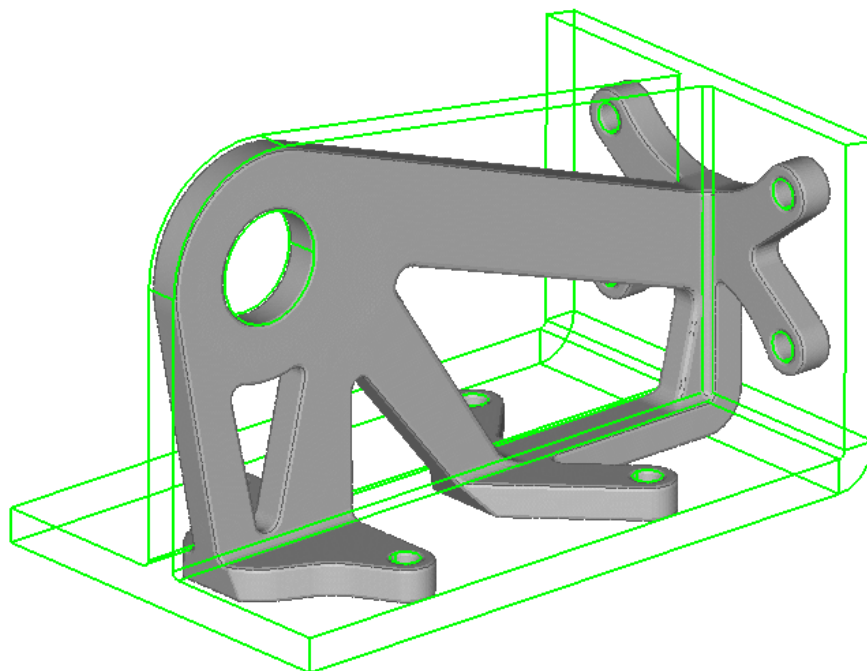


Figura 36 - *Design* final do componente otimizado.

Para ver qual a influência do material na solução final, efetuou-se a substituição do mesmo. Deste modo foram utilizados dois materiais distintos. O primeiro é um material também muito utilizado por esta indústria, nomeadamente as ligas de titânio (Ti). Então, poderá ser considerada a aplicação de ligas de Ti neste componente. Uma liga que é muitas vezes utilizada é a Ti-6Al-4V, contudo a ASTM oferece várias ligas de Ti apropriadas para metalurgia de pó, que são naturalmente mais adequadas para FA. Deste modo o material utilizado para estudo será a liga de Titânio ASTM B817. As propriedades deste material são apresentadas na Tabela 8 [53].

Tabela 8 - Propriedade mecânicas do Titânio ASTM B817 Tipo I Grau 2 [53].

Material	E (MPa)	G (MPa)	σ_{ced} (MPa)	σ_{rot} (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
ASTM B817						
Tipo I Grau 2	100	40	810	900	0.32	4420
Titânio						

O outro material escolhido foi o aço AISI 1060. Apesar de apresentar uma densidade bastante superior quando comparado com o Al ou Ti, o aço apresenta também um módulo de elasticidade bastante superior, e assim consegue-se uma comparação mais ampla. Na Tabela 9 [54] estão apresentadas as propriedades deste material.

Tabela 9 - Propriedade mecânicas do Aço AISI 1060 [54].

Material	E (MPa)	G (MPa)	σ_{ced} (MPa)	σ_{rot} (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Aço	205	80	420	779	0.29	7850

Após reanálise do componente C para os diferentes materiais verificou-se que em ambos os casos a redução do valor das tensões não é muito significativa (Tabela 10), portanto, o aumento de peso devido à densidade destes materiais, não é satisfatório quando comparado com o ganho de rigidez. Uma análise mais detalha está representada no Anexo F.

Tabela 10 - Comparação das tensões para os diferentes componentes e materiais.

Componente	σ_{max} (MPa)		Massa (g)	Volume (m³)
	Caso de estudo 1	Caso de estudo 2		
Componente Original	113,27	436,73	178	2,35716 x 10 ⁻⁵
Componente A	208,22	776,84	65,35	2,42025 x 10 ⁻⁵
Componente B	625,41	458,69	50,46	1,86877 x 10 ⁻⁵
Componente C (Al)	197,52	436,00	63,64	2,35716 x 10 ⁻⁵
Componente C (aço)	189,03	429,07	186,22	
Componente C (Ti)	191,36	431,05	104,39	

3.8 Discussão de Resultados

Ambas os casos representam as duas situações mais críticas a que o componente está solicitado durante a sua utilização. Há uma enorme diferença na comparação de resultados em cada um dos casos de carga. O caso de estudo 1, apresenta valores bastante inferiores aos apresentados pelo caso de estudo 2. Os valores de referência são muito importantes devido ao facto de nos orientarem perante uma análise, apesar do refinamento da malha ser importante, não significa que quanto mais refinada melhor, pois pode induzir-nos em erro se não tivermos valores reais para comparar. O caso de estudo 2 representa uma dessa situações.

Os componente A e B, foram desenhados em função das cargas aplicadas, caso de estudo 1 e 2 respetivamente. Devido a essa implicação quando eles foram solicitados a outro esforço para além daquele para o qual foram projetados, eles apresentam um comportamento insuficiente perante as exigências.

Após ter-se concluído que projetar dois componentes diferentes em função de cada uma das cargas, foi uma estratégia menos bem conseguida, que serviu como aprendizagem, para posteriormente se proceder então ao desenvolvimento de um *design* principal que resolvesse as duas situações. Este componente C, resolve de facto ambas as situações, contudo o valor das tensões para o caso de estudo 1 aumentou ligeiramente, apesar de não ser muito relevante como já foi referido anteriormente em 3.7. Mas visto que um dos objetivos iniciais seria manter ou diminuir as tensões, isso apenas foi conseguido para o caso de estudo 2, que era o caso mais crítico.

Antes da substituição do material, havia uma expectativa de redução das tensões, algo que foi verificado, contudo, a redução foi praticamente insignificante e a troca de material para este componente não era justificável.

3.9 Preparação do Componente Otimizado para Produção

Após ter o componente com o *design* final definido é importante efetuar a verificação da necessidade da inclusão de suportes. Por norma, todas as inclinações superiores a 30° , não necessitam de suportes [50]. A orientação da peça é importante, pois como pode ser verificado na Figura 37, dependendo da mesma podem ser necessários mais, menos, ou até menos nenhum suporte como foi referido no DpFA (2.6).

A Figura 37 demonstra três exemplos de possíveis orientações para fabrico da peça, e cada uma delas apresenta um número de suportes diferente.

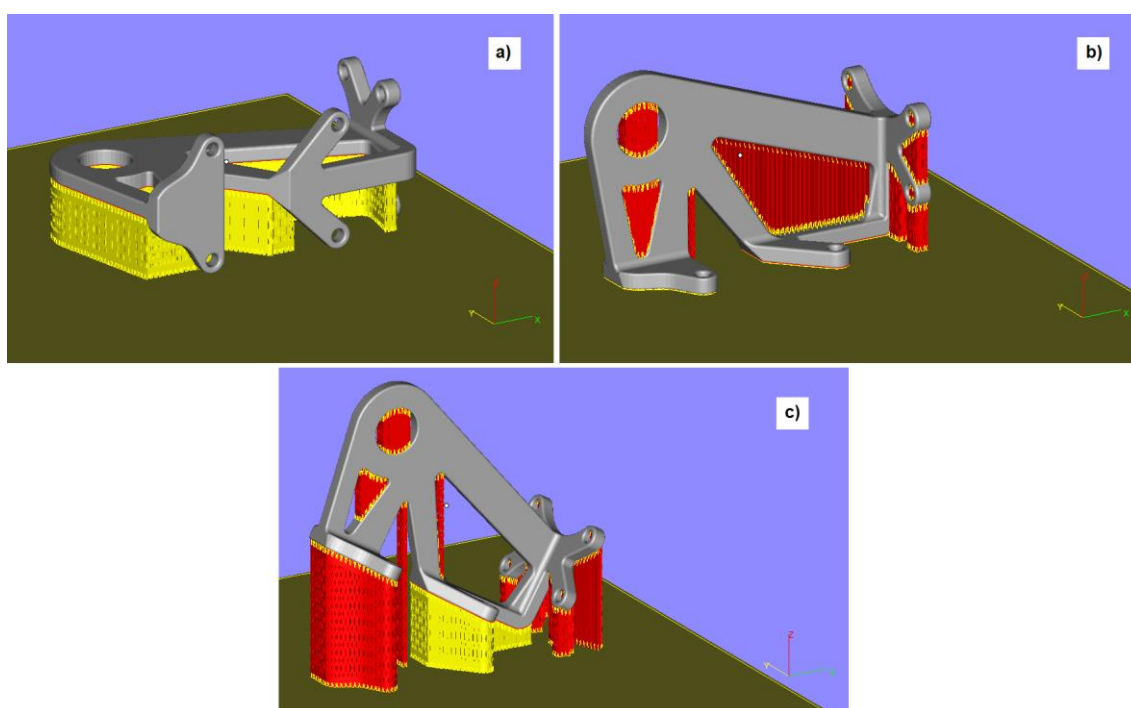


Figura 37 - Influência da orientação da peça na quantidade de suportes: a) horizontal. b) vertical. c) 30° de inclinação.

Neste caso a orientação b) seria a mais indicada, pois gera menos suportes. Estes são criados para auxiliar a fabricação, de modo a manter o formato, até ao final da mesma. Contudo, visto que é necessário a remoção dos mesmos posteriormente, o que leva ao aumento do tempo de fabrico e do gasto de material, o que não é produtivo.

3.10 Fabricação Aditiva (FA) vs Fabricação Subtrativa (FS)

A maquinagem é um exemplo dos vários processos de fabricação para remoção controlada de material. Um bloco de matéria prima pode ser cortado de forma intencional para a obtenção de um formato final desejado. Os processos que têm este princípio são conhecidos como fabricação subtrativa, em oposição à fabricação aditiva, que foi anteriormente falada na revisão bibliográfica.

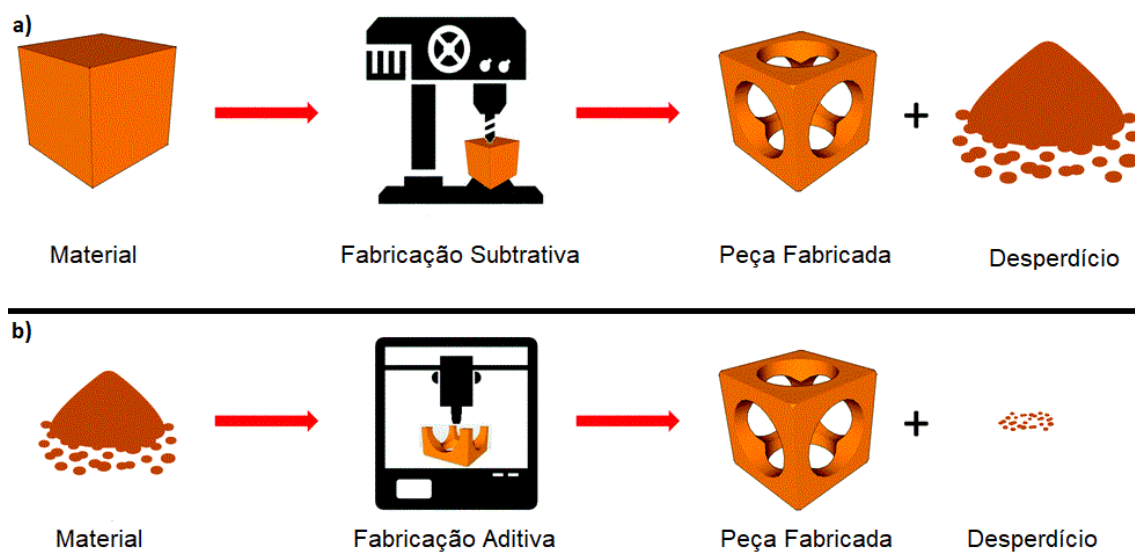


Figura 38 - Exemplo demonstrativo e comparativo entre princípios de fabrico: a) – FA; b) – FS. Adaptado de [55].

Estes dois métodos de fabricação, têm diferentes vantagens e desvantagens, algo que lhes confere características distintas [56]. Como tal, cada um deles é adequado para diferentes circunstâncias, como irá ser apresentado neste capítulo, numa breve comparação.

Material: A FA de metais é considerada atualmente ainda um processo recente. Apesar da sua elevada capacidade de utilizar uma grande variedade de materiais, desde polímeros, metais, cerâmicos, etc., como referido anteriormente no capítulo 2.1.1 [50], existem algumas ligas metálicas mais sofisticadas, ou menos comuns, que ainda não foram testadas. Como tal, apenas por FS é possível trabalhar esses materiais. Contudo,

num futuro próximo, os especialistas acreditam que será possível fabricar em qualquer material, desde que sejam conhecidas as suas propriedades e características [57].

Velocidade: A FA permite produzir peças complexas num menor tempo que a maquinagem CNC [50]. Para além disso, não necessita de ferramentas específicas ou suportes. Isto permite ao fabricante uma capacidade de resposta superior, podendo assim alocar algum desse tempo para o desenvolvimento do produto. A FS requer a instalação de ferramentas, e até mesmo de programação para peças novas.

Complexidade: Com a FA, é possível a produção de peças com geometrias complexas (forma livre). Como é um processo de deposição, onde a peça é construída por camadas, pode conter vazios e até mesmo uma estrutura oca [50]. Com a maquinagem, a criação de algumas estruturas internas mais complexas não é possível, devido a não haver nenhum acesso para a ferramenta.

Acabamento: Apesar da na FA ser possível atingir uma boa tolerância dimensional e na maioria dos casos com resultados precisos, a FS é capaz de atingir melhores tolerâncias e acabamentos superficiais [50].

Quantidade: A FA é mais adequada para fabricação de peças isoladas ou pequenas séries, quando os aspetos primordiais são o material, tolerância e acabamento, pois considera-se que não necessita de tempo de montagem [13]. A FS requer mais tempo de preparação (programação e montagem), bem como conhecimentos por parte do operador [56]. Contudo, se for para produzir um grande volume de peças, provavelmente então considera-se a mudança para um processo subtrativo [50].

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÃO INICIAL

4.2 TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES

4.1 Conclusão Inicial

Durante a realização deste trabalho pode-se apurar que a OT implementada provou ser um meio muito eficaz de aproveitar as vantagens oferecidas pela liberdade de fabricação proveniente da FA. Uma vez que foi possível diminuir o volume de material do componente em 65%, o que resultou também em uma redução de massa do mesmo valor.

Após a remodelação da solução proveniente da OT obteve-se um *design* com geometria complexa. Contudo isso não representou um entrave para posterior fabricação porque a FA não possui grandes limitações de geometria, quando comparado aos métodos mais convencionais. Então apesar da complexidade da peça será possível que esta seja fabricada sem aumentar os custos e/ou tempos de produção.

A análise MEF do componente original apresentou valores de tensões muito próximos daqueles obtidos durante os ensaios. O que leva a crer que os resultados extraídos da análise final do componente otimizado são credíveis, contudo será necessário validar através de ensaios mecânicos.

A criação de linhas de orientação foi um ponto importante para automatizar ou tornar mais rápido a execução de determinadas tarefas. Quando se está a realizar um trabalho idêntico a este pela primeira vez, é natural que surjam dúvidas e questões, mas com auxílio destas linhas de orientação é de fácil identificação quais os pontos a ter em consideração em cada uma das etapas.

4.2 Trabalhos Futuros

Em termos de trabalho futuro, será necessário efetuar a validação dos cálculos teóricos conseguidos pelo MEF. Esta validação só será conseguida através da fabricação e teste do componente otimizado. Dado que, durante a fabricação da peça existem fatores que podem influenciar a resistência da mesma, nomeadamente os parâmetros da máquina. Por esses e outros aspetos é importante efetuar essa validação.

Contudo, anteriormente à produção do componente seria interessante ver a influência no resultado final de cada um dos parâmetros referidos em 2.1.2, através de análise microscópica.

Interessante também seria fazer testes para ver a precisão conseguida pela máquina em diversos tipos de geometrias, como por exemplo, cones, esferas, cubos, entre outras formas.

Seria uma mais valia também trabalhar ainda mais a área de otimização, para estudar a diferença obtida entre estes e outros tipos de otimização, por exemplo, otimização de formas. Outra otimização muito interessante seria a implementação de estruturas em treliça.

Um outro ponto interessante seria aprimorar as linhas de orientação construídas em 3.1, pois são uma ferramenta bastante importante para automatizar as diversas etapas.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 REFERÊNCIAS

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Referências

- [1] S. Yang, Y. Tang, and Y. F. Zhao, “A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing,” *J. Manuf. Process.*, no. 1. Introduction, pp. 1–2, 2015.
- [2] J. Gausemeier, “Thinking ahead of the future of Additive Manufacturing – Analysis of Promising Industries,” University of Paderborn, 2011.
- [3] SmarTech, “Additive Manufacturing in Aerospace: Strategic Implications,” *SmarTech Markets Publishing*, pp. 1–5, 2014.
- [4] L. M. Seabra, “Design Optimisation for Selective Laser Melting (SLM) and Experimental Testing of an Aircraft Component,” Instituto Superior Técnico (IST), 2015.
- [5] D. G. Hernández, “Mechanical behaviour assessment of the Ti6Al4V alloy obtained by additive manufacturing towards aeronautical industry,” Instituto Superior Técnico (IST), 2014.
- [6] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2010.
- [7] D. Thomas, “The Development of Design Rules for Selective Laser Melting,” 2009.
- [8] D. L. D. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, and D. W. Rosen, “A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead,” *US-Turkey Work. Rapid Technol.*, 2009.
- [9] ASTM International, *F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. 2015.
- [10] J. E. Blather, “Manufacture of Contour Relief Maps,” US Patent 473901, 1892.
- [11] G. N. Levy, R. Schindel, and J. P. Kruth, “Rapid Manufacturing and Rapid Tooling With Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future

- Perspectives,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 589–609, 2003.
- [12] T. Wohlers and T. Gornet, “History of Additive Manufacturing,” *Wohlers Rep. 2014 - 3D Print. Addit. Manuf. State Ind.*, p. 1, 2014.
- [13] Additive Manufacturing Research Group, “The 7 Categories of Additive Manufacturing.” [Online]. Available: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>. [Accessed: 15-Jul-2017].
- [14] Wohlers Associates Inc., *Wohler’s report 2015 - 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual Worldwide Progress Report*. 2015.
- [15] J.-P. Kruth, M. C. Leu, and T. Nakagawa, “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 525–540, 1998.
- [16] M. Fahad and N. Hopkinson, “A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing (AM) processes,” *2nd Int. Conf. Mech. Prod. Automob. Eng.*, pp. 234–238, 2012.
- [17] P. F. Jacobs, *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography*, First edit. Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [18] EOS e-Manufacturing Solutions, “Additive Manufacturing, Laser-Sintering and industrial 3D printing - Benefits and Functional Principle.” [Online]. Available: https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested. [Accessed: 25-May-2017].
- [19] J. Scott, N. Gupta, C. Weber, and S. Newsome, “Additive manufacturing: Status and opportunities,” *Sci. Technol. Policy Inst.*, pp. 1–19, 2012.
- [20] International Organization for Standardization (ISO) & American Society for Testing and Materials (ASTM), *Additive manufacturing — General principles — Terminology (ISO/ASTM 52900:2015)*. 2015.
- [21] Granta Material Intelligence, “CES EduPack Tools and Resources,” 2017. [Online]. Available: <https://www.grantadesign.com/news/media.htm>. [Accessed: 20-Aug-2017].

- [22] M. Molitch-Hou, "Boeing and Lotus F1 team to 3D print carbon reinforced parts." [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/boeing-lotus-f1-team-3d-print-carbon-reinforced-parts-29994/>. [Accessed: 12-Jun-2017].
- [23] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, and L. Hou, "Additive manufacturing and its societal impact: A literature review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1191–1203, 2013.
- [24] M. Yakout, A. Cadamuro, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis, "The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 3–5, 2017.
- [25] Chor Yen Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, and Swee Leong Sing, "Review of selective laser melting: Materials and applications." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Chor_Yen_Yap/publication/286497734/figure/fig2/AS:307081765769216@1450225406016/FIG-2-SLM-process-parameters-laser-power-scanning-speed-hatch-spacing-and-layer.png. [Accessed: 05-Sep-2017].
- [26] V. E. Beal, "Fabricação de gradientes funcionais entre aço ferramenta e cobre por fusão seletiva a laser usando um feixe de laser pulsado Nd: YAG de alta potência para aplicações em moldes de injeção," pp. 45–53, 87–94, 2005.
- [27] Q. Zhang, Z. Liangl, M. Cao, and E. Al, "Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting combined with precision forging," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, pp. 1036–1042, 2017.
- [28] R. (2016) Campilho, *Método de Elementos Finitos*. 2016.
- [29] C. A. Soto, "Structural topology optimisation: from minimising compliance to maximising energy absorption," *Int. J. Veh. Des.*, pp. 142–163, 2001.
- [30] C. Chin-Jung and U. Mohammad, "Design optimisation for automotive applications," *Int. J. Veh. Des.*, pp. 126–141, 2001.
- [31] M. Saunders, "Is topological optimisation really optimal?," *Renishaw*, 2017. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/topological-optimisation->

- really-optimal-marc-saunders. [Accessed: 10-Jul-2017].
- [32] M. Yulin and W. Xiaoming, "A level set method for structural topology optimization and its applications," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 35, pp. 415–441, 2004.
- [33] G. I. N. Rozvany, "Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics," *Struct. Multidiscip. Optim.*, pp. 90–108, 2001.
- [34] K. Suzuki and N. Kikuchi, "A homogenization method for shape and topology optimization," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, pp. 291–318, 1991.
- [35] S. Schwarz, K. Maute, and E. Ramm, "Topology and shape optimization for elastoplastic structural response," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 190, pp. 2135–2155, 2001.
- [36] G. W. Jang, K. J. Kim, and Y. Y. Kim, "Integrated topology and shape optimization software for compliant MEMS mechanism design," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 39, pp. 1–14, 2008.
- [37] Y. Saadlaoui, J. L. Milan, J. M. Rossi, and P. Chabrand, "Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes," *J. Manuf. Syst.*, vol. 43, pp. 178–186, 2017.
- [38] M. P. Bendsøe, "Optimal shape design as a material distribution problem," *Struct. Optim.*, vol. 1, pp. 193–202, 1989.
- [39] H. P. Mlejnek, "Some aspects of the genesis of structures," *Struct. Optim.*, vol. 5, pp. 64–69, 1992.
- [40] A. Schumacher, "Optimierung mechanischer Strukturen," 2005.
- [41] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods, and applications*. 2003.
- [42] P. Naude, "Design by volume, mass and load," *ESTEQ Engineering*, 2013. [Online]. Available: <https://esteq.co.za/2013/11/25/design-volume-mass-load/>. [Accessed: 20-Jul-2017].

- [43] E. Schelkle and H. Klamser, "CAE Simulations for Passive Safety focused on the Porsche Cayenne-the Transition to New Technologies," *4th Eur. LS-DYNA ...*, pp. 73–82, 2003.
- [44] A. Schumacher, M. Seibel, H. Zimmer, and M. Schäfer, "New optimization strategies for crash design Abstract :," *4th Ger. LS-DYNA Forum, Bamb.*, pp. 1–14, 2005.
- [45] Altair Engineering Inc., "Inspired by Nature: Electric Motorcycle goes 3D - Combining Topology Optimization, New Materials, and Additive Manufacturing in the Development of the Airbus APWorks Light Rider Results in a Revolutionary Lightweight Design," 2017.
- [46] M. Muir, J. Meyer, and A. Diskin, "Multidisciplinary Optimisation of Business Jet MED Hinge for Production by Additive Manufacturing," 2013. [Online]. Available: <http://altairatc.com/europe/eatc2013-abstracts/day1/session-3/eads-muir.html>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [47] R. Ponche, Y. Hascoet, D. Kerbrat, and P. Mognol, "A New Global Approach to Design For Additive Manufacturing," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 7, pp. 93–105, 2012.
- [48] Wohlers Associates Inc., "Manufacturers and Developers of Additive Systems and Materials," 2017. [Online]. Available: <http://wohlersassociates.com/manufacturers-and-developers.html>. [Accessed: 19-Aug-2017].
- [49] C. Klahn, B. Leutenecker, and M. Meboldt, "Design for additive manufacturing - Supporting the substitution of components in series products," *Procedia CIRP*, pp. 138–143, 2014.
- [50] M. Saunders, "DfAM essentials - print parts efficiently and effectively," *Renishaw*, 2016. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/dfam-essentials-print-parts-efficiently-effectively-marc-saunders/>. [Accessed: 10-Jul-2017].
- [51] P. Rambabu, N. E. Prasad, and V. V. Kutumbarao, "Aerospace Materials and Material Technologies," 2017.

- [52] J. F. Li *et al.*, “Aluminum 7075-T6; 7075-T651,” *Acta Mater.*, vol. 59, no. 1, pp. 1–10, 2012.
- [53] G. Lutjering and J. C. Williams, “ASTM B817 Type I Grade 2 Class A Titanium,” *MakeItFrom.com*, 2017. [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-B817-Type-I-Grade-2-Class-A-Titanium>. [Accessed: 13-Sep-2017].
- [54] I. Kaban *et al.*, “AISI 1060 Steel, normalized at 900°C (1650°F),” *J. Alloys Compd.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–7, 2013.
- [55] A. Ambrosi and M. Pumera, “3D-printing technologies for electrochemical applications,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 45, pp. 2740–2755, 2016.
- [56] Creative Mechanisms, “Additive Manufacturing vs Subtractive Manufacturing,” 2016. [Online]. Available: <https://www.creativemechanisms.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing>. [Accessed: 29-Aug-2017].
- [57] Digital Engineering, “Comparing Additive and Subtractive Processes.” [Online]. Available: <http://www.digitaleng.news/de/comparing-additive-and-subtractive-processes/>. [Accessed: 29-Aug-2017].

ANEXOS

ANEXO A - *DATASHEET* DO AÇO

ANEXO B - *DATASHEET* DO ALUMÍNIO

ANEXO C - *DATASHEET* DO TITÂNIO

ANEXO D - ITERAÇÕES DE CONVERGÊNCIA MALHA CASO 1

ANEXO E - ITERAÇÕES DE CONVERGÊNCIA MALHA CASO 2

ANEXO F - RESULTADOS DAS ANÁLISES AOS COMPONENTES A, B E C

ANEXO A

DATASHEET DO AÇO

AISI 1060 Steel, normalized at 900°C (1650°F)

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [AISI 1000 Series Steel](#); [High Carbon Steel](#)

Material Notes: Has characteristics similar to those of AISI 1055



Key Words: AMS 7240, ASTM A29, ASTM A510, ASTM A576, ASTM A682, UNS G10600

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in³	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	229	229	
Hardness, Knoop	252	252	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	96	96	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell C	19	19	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	241	241	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	779 MPa	113000 psi	
Tensile Strength, Yield	420 MPa	60900 psi	
Elongation at Break	18 %	18 %	In 50 mm
Reduction of Area	32 %	32 %	
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.29	0.29	Typical For Steel
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel
Izod Impact	14.0 J	10.3 ft-lb	

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000180 ohm-cm @Temperature 20.0 °C	0.0000180 ohm-cm @Temperature 68.0 °F	condition of specimen unknown

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.0 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	6.11 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	12.2 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 300 °C	6.78 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 572 °F	
	13.7 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 500 °C	7.61 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity 	0.502 J/g-°C @Temperature >=100 °C	0.120 BTU/lb-°F @Temperature >=212 °F	condition unknown
	0.544 J/g-°C @Temperature 150 - 200 °C	0.130 BTU/lb-°F @Temperature 302 - 392 °F	
Thermal Conductivity	49.8 W/m-K	346 BTU-in/hr-ft²-°F	Typical steel

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.55 - 0.66 %	0.55 - 0.66 %	
Iron, Fe	98.35 - 98.85 %	98.35 - 98.85 %	As remainder
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %	0.60 - 0.90 %	
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

ANEXO B

DATASHEET DO ALUMÍNIO

Aluminum 7075-T6; 7075-T651

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [7000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: General 7075 characteristics and uses (from Alcoa): Very high strength material used for highly stressed structural parts. The T7351 temper offers improved stress-corrosion cracking resistance.

Applications: Aircraft fittings, gears and shafts, fuse parts, meter shafts and gears, missile parts, regulating valve parts, worm gears, keys, aircraft, aerospace and defense applications; bike frames, all terrain vehicle (ATV) sprockets.

Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.

Composition Notes:

A Zr + Ti limit of 0.25 percent maximum may be used with this alloy designation for extruded and forged products only, but only when the supplier or producer and the purchaser have mutually so agreed. Agreement may be indicated, for example, by reference to a standard, by letter, by order note, or other means which allow the Zr + Ti limit.

Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.



Key Words: Aluminium 7075-T6; Aluminium 7075-T651, UNS A97075; ISO AlZn5.5MgCu; Aluminium 7075-T6; Aluminium 7075-T651; AA7075-T6




Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.81 g/cc	0.102 lb/in ³	AA; Typical

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	150	150	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	191	191	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	53.5	53.5	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	87	87	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	175	175	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	572 MPa	83000 psi	AA; Typical

	41.0 MPa	5950 psi	
	@Temperature 371 °C	@Temperature 700 °F	
	55.0 MPa	7980 psi	
	@Temperature 316 °C	@Temperature 601 °F	
	76.0 MPa	11000 psi	
	@Temperature 260 °C	@Temperature 500 °F	
	110 MPa	16000 psi	
	@Temperature 204 °C	@Temperature 399 °F	
	214 MPa	31000 psi	
	@Temperature 149 °C	@Temperature 300 °F	
	483 MPa	70100 psi	
	@Temperature 100 °C	@Temperature 212 °F	
	572 MPa	83000 psi	
	@Temperature 24.0 °C	@Temperature 75.2 °F	
	593 MPa	86000 psi	
	@Temperature -28.0 °C	@Temperature -18.4 °F	
	621 MPa	90100 psi	
	@Temperature -80.0 °C	@Temperature -112 °F	
	703 MPa	102000 psi	
	@Temperature -196 °C	@Temperature -321 °F	
	>= 462 MPa	>= 67000 psi	Plate; T62, T651
	@Thickness 88.93 - 102 mm	@Thickness 3.501 - 4.00 in	
	>= 490 MPa	>= 71100 psi	Plate; T62, T651
	@Thickness 76.23 - 88.9 mm	@Thickness 3.001 - 3.50 in	
	>= 496 MPa	>= 71900 psi	Plate; T62, T651
	@Thickness 63.53 - 76.2 mm	@Thickness 2.501 - 3.00 in	
	>= 510 MPa	>= 74000 psi	Sheet
	@Thickness 0.203 - 0.279 mm	@Thickness 0.00800 - 0.0110 in	
	>= 524 MPa	>= 76000 psi	Sheet
	@Thickness 0.305 - 0.991 mm	@Thickness 0.0120 - 0.0390 in	
	>= 524 MPa	>= 76000 psi	Plate; T62, T651
	@Thickness 50.83 - 63.5 mm	@Thickness 2.001 - 2.50 in	
	>= 531 MPa	>= 77000 psi	Plate; T62, T651
	@Thickness 25.43 - 50.8 mm	@Thickness 1.001 - 2.00 in	
	>= 538 MPa	>= 78000 psi	Sheet
	@Thickness 1.02 - 3.17 mm	@Thickness 0.0400 - 0.125 in	
	>= 538 MPa	>= 78000 psi	Sheet
	@Thickness 3.20 - 6.32 mm	@Thickness 0.126 - 0.249 in	
	>= 538 MPa	>= 78000 psi	Plate; T62, T651
	@Thickness 6.35 - 12.7 mm	@Thickness 0.250 - 0.499 in	

	>= 538 MPa @Thickness 12.7 - 25.4 mm	>= 78000 psi @Thickness 0.500 - 1.00 in	Plate; T62, T651
Tensile Strength, Yield	503 MPa	73000 psi	AA; Typical
	>= 372 MPa @Thickness 88.93 - 102 mm	>= 54000 psi @Thickness 3.501 - 4.00 in	Plate; T62, T651
	>= 400 MPa @Thickness 76.23 - 88.9 mm	>= 58000 psi @Thickness 3.001 - 3.50 in	Plate; T62, T651
	>= 421 MPa @Thickness 63.53 - 76.2 mm	>= 61100 psi @Thickness 2.501 - 3.00 in	Plate; T62, T651
	>= 434 MPa @Thickness 0.203 - 0.279 mm	>= 62900 psi @Thickness 0.00800 - 0.0110 in	Sheet
	>= 441 MPa @Thickness 50.83 - 63.5 mm	>= 64000 psi @Thickness 2.001 - 2.50 in	Plate; T62, T651
	>= 462 MPa @Thickness 0.305 - 0.991 mm	>= 67000 psi @Thickness 0.0120 - 0.0390 in	Sheet
	>= 462 MPa @Thickness 6.35 - 12.7 mm	>= 67000 psi @Thickness 0.250 - 0.499 in	Plate; T62, T651
	>= 462 MPa @Thickness 25.43 - 50.8 mm	>= 67000 psi @Thickness 1.001 - 2.00 in	Plate; T62, T651
	>= 469 MPa @Thickness 1.02 - 3.17 mm	>= 68000 psi @Thickness 0.0400 - 0.125 in	Sheet
	>= 469 MPa @Thickness 12.7 - 25.4 mm	>= 68000 psi @Thickness 0.500 - 1.00 in	Plate; T62, T651
	>= 476 MPa @Thickness 3.20 - 6.32 mm	>= 69000 psi @Thickness 0.126 - 0.249 in	Sheet
	32.0 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 271 °C	4640 psi @Strain 0.200 %, Temperature 520 °F	
	45.0 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 316 °C	6530 psi @Strain 0.200 %, Temperature 601 °F	
	62.0 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 260 °C	8990 psi @Strain 0.200 %, Temperature 500 °F	
	87.0 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 204 °C	12600 psi @Strain 0.200 %, Temperature 399 °F	
	186 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 149 °C	27000 psi @Strain 0.200 %, Temperature 300 °F	
	448 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 100 °C	65000 psi @Strain 0.200 %, Temperature 212 °F	
	503 MPa @Strain 0.200 %, Temperature 24.0 °C	73000 psi @Strain 0.200 %, Temperature 75.2 °F	
	517 MPa @Strain 0.200 %, Temperature -28.0 °C	75000 psi @Strain 0.200 %, Temperature -18.4 °F	
	545 MPa @Strain 0.200 %, Temperature -80.0 °C	79000 psi @Strain 0.200 %, Temperature -112 °F	
	634 MPa @Strain 0.200 %, Temperature -196 °C	92000 psi @Strain 0.200 %, Temperature -321 °F	
Elongation at Break 	9.0 % @Temperature -196 °C	9.0 % @Temperature -321 °F	
	11 % @Temperature -80.0 °C	11 % @Temperature -112 °F	
	11 % @Temperature -28.0 °C	11 % @Temperature -18.4 °F	
	11 % @Temperature 24.0 °C	11 % @Temperature 75.2 °F	
	14 % @Temperature 100 °C	14 % @Temperature 212 °F	
	30 % @Temperature 149 °C	30 % @Temperature 300 °F	
	55 % @Temperature 204 °C	55 % @Temperature 399 °F	
	65 % @Temperature 260 °C	65 % @Temperature 500 °F	
	70 % @Temperature 316 °C	70 % @Temperature 601 °F	
	70 % @Temperature 316 °C	70 % @Temperature 601 °F	



	10 % @Temperature 371 °C	10 % @Temperature 700 °F	
	>= 3.0 % @Thickness 88.93 - 102 mm	>= 3.0 % @Thickness 3.501 - 4.00 in	Plate; T62, T651
	>= 5.0 % @Thickness 0.203 - 0.279 mm	>= 5.0 % @Thickness 0.00800 - 0.0110 in	Sheet
	>= 5.0 % @Thickness 50.83 - 63.5 mm	>= 5.0 % @Thickness 2.001 - 2.50 in	Plate; T62, T651
	>= 5.0 % @Thickness 63.53 - 76.2 mm	>= 5.0 % @Thickness 2.501 - 3.00 in	Plate; T62, T651
	>= 5.0 % @Thickness 76.23 - 88.9 mm	>= 5.0 % @Thickness 3.001 - 3.50 in	Plate; T62, T651
	>= 6.0 % @Thickness 25.43 - 50.8 mm	>= 6.0 % @Thickness 1.001 - 2.00 in	Plate; T62, T651
	>= 7.0 % @Thickness 0.305 - 0.991 mm	>= 7.0 % @Thickness 0.0120 - 0.0390 in	Sheet
	>= 7.0 % @Thickness 12.7 - 25.4 mm	>= 7.0 % @Thickness 0.500 - 1.00 in	Plate; T62, T651
	>= 8.0 % @Thickness 1.02 - 3.17 mm	>= 8.0 % @Thickness 0.0400 - 0.125 in	Sheet
	>= 8.0 % @Thickness 3.20 - 6.32 mm	>= 8.0 % @Thickness 0.126 - 0.249 in	Sheet
	>= 9.0 % @Thickness 6.35 - 12.7 mm	>= 9.0 % @Thickness 0.250 - 0.499 in	Plate; T62, T651
	11 % @Thickness 1.59 mm	11 % @Thickness 0.0625 in	AA; Typical
	11 % @Diameter 12.7 mm	11 % @Diameter 0.500 in	AA; Typical
Modulus of Elasticity	71.7 GPa	10400 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Poissons Ratio	0.33	0.33	
Fatigue Strength	159 MPa @# of Cycles 5.00e+8	23000 psi @# of Cycles 5.00e+8	completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
Fracture Toughness	17.6 MPa-m ^{1/2} 16.5 - 19.8 MPa-m ^{1/2} 18.7 MPa-m ^{1/2} 20.0 MPa-m ^{1/2} 22.0 - 25.3 MPa-m ^{1/2} 24.2 MPa-m ^{1/2} 25.0 MPa-m ^{1/2} 28.6 MPa-m ^{1/2} 27.5 - 29.7 MPa-m ^{1/2} 29.0 MPa-m ^{1/2}	16.0 ksi-in ^{1/2} 15.0 - 18.0 ksi-in ^{1/2} 17.0 ksi-in ^{1/2} 18.2 ksi-in ^{1/2} 20.0 - 23.0 ksi-in ^{1/2} 22.0 ksi-in ^{1/2} 22.8 ksi-in ^{1/2} 26.0 ksi-in ^{1/2} 25.0 - 27.0 ksi-in ^{1/2} 26.4 ksi-in ^{1/2}	T651; Plate; S-L; average T651; Plate; S-L T651; Forgings; S-L K(IC) in S-L Direction T651; Plate; T-L T651; Plate; T-L; average K(IC) in T-L Direction T651; Plate; L-T; average T651; Plate; L-T K(IC) in L-T Direction
Machinability	70 %	70 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	26.9 GPa	3900 ksi	
Shear Strength	331 MPa	48000 psi	AA; Typical
Electrical Properties			
	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000515 ohm-cm @Temperature 20.0 °C	0.00000515 ohm-cm @Temperature 68.0 °F	AA; Typical
Thermal Properties			
	Metric	English	Comments
CTE, linear	21.6 µm/m-°C @Temperature -50.0 - 20.0 °C	12.0 µin/in-°F @Temperature -58.0 - 68.0 °F	
	23.4 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.0 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	23.6 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.1 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	AA; Typical; average over range
	24.3 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 200 °C	13.5 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 392 °F	
	25.2 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 300 °C	14.0 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 572 °F	
Specific Heat Capacity	0.960 J/g-°C	0.229 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	130 W/m-K	900 BTU-in/hr-ft ² -°F	AA; Typical at 77°F
Melting Point	477 - 635.0 °C	890 - 1175 °F	AA; Typical range based on typical composition for wrought products 1/4 inch thickness or greater. Homogenization may raise eutectic melting temperature 20-40°F but usually does not eliminate eutectic melting.
Solidus	477 °C	890 °F	AA; Typical
Liquidus	635.0 °C	1175 °F	AA; Typical
Processing Properties			
	Metric	English	Comments

Annealing Temperature	413 °C	775 °F
Solution Temperature	466 - 482 °C	870 - 900 °F
Aging Temperature	121 °C	250 °F

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	87.1 - 91.4 %	87.1 - 91.4 %	As remainder
Chromium, Cr	0.18 - 0.28 %	0.18 - 0.28 %	
Copper, Cu	1.2 - 2.0 %	1.2 - 2.0 %	
Iron, Fe	<= 0.50 %	<= 0.50 %	
Magnesium, Mg	2.1 - 2.9 %	2.1 - 2.9 %	
Manganese, Mn	<= 0.30 %	<= 0.30 %	
Other, each	<= 0.05 %	<= 0.05 %	
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
Silicon, Si	<= 0.40 %	<= 0.40 %	
Titanium, Ti	<= 0.20 %	<= 0.20 %	
Zinc, Zn	5.1 - 6.1 %	5.1 - 6.1 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

ANEXO C

DATASHEET DO TITÂNIO

ASTM B817 Type I Grade 2 Class A Titanium

ASTM B817 type I grade 2 class A is a type of ASTM B817 type I. It is furnished in the as-fabricated (no temper or treatment) condition. The graph bars on the material properties cards below compare ASTM B817 type I grade 2 class A to: powder metallurgy titanium alloys (top), all titanium alloys (middle), and the entire database (bottom).

Mechanical Properties

Elastic (Young's, Tensile) Modulus

100 GPa

15 x 10⁶ psi

Elongation at Break

8.0 %

Fatigue Strength

450 MPa

65 x 10³ psi

Menu

0.32

Reduction in Area

18 %

Shear Modulus

40 GPa

5.8 x 10⁶ psi

Tensile Strength: Ultimate (UTS)

900 MPa

130 x 10³ psi

Tensile Strength: Yield (Proof)

810 MPa

120 x 10³ psi

Thermal Properties

Menu

1550 °C

2830 °F

Specific Heat Capacity

560 J/kg-K

0.13 BTU/lb-°F

Thermal Expansion

9.6 µm/m-K

Otherwise Unclassified Properties

Base Metal Price

36 % relative

Density

4.4 g/cm³

280 lb/ft³

Menu

38 kg CO₂/kg material

Embodied Energy

610 MJ/kg

260 x 10³ BTU/lb

Embodied Water

200 L/kg

23 gal/lb

Common Calculations

Resilience: Ultimate (Unit Rupture Work)

70 MJ/m³

Resilience: Unit (Modulus of Resilience)

3160 kJ/m³

Menu

13 points

Stiffness to Weight: Bending

35 points

Strength to Weight: Axial

57 points

Strength to Weight: Bending

47 points

Thermal Shock Resistance

64 points

Alloy Composition

ANEXO D

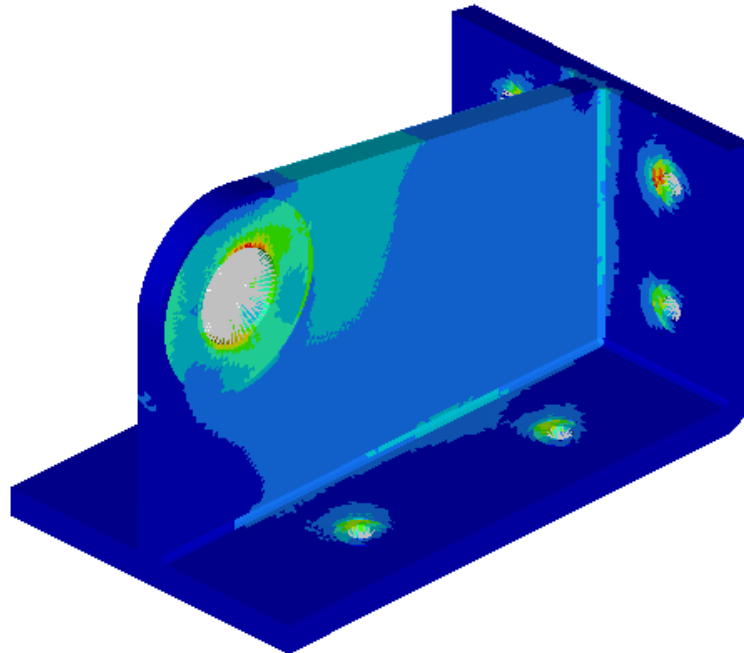
ITERAÇÕES DE CONVERGÊNCIA MALHA CASO 1

Convergência de malha caso de estudo 1

Tamanho do elemento: 1 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

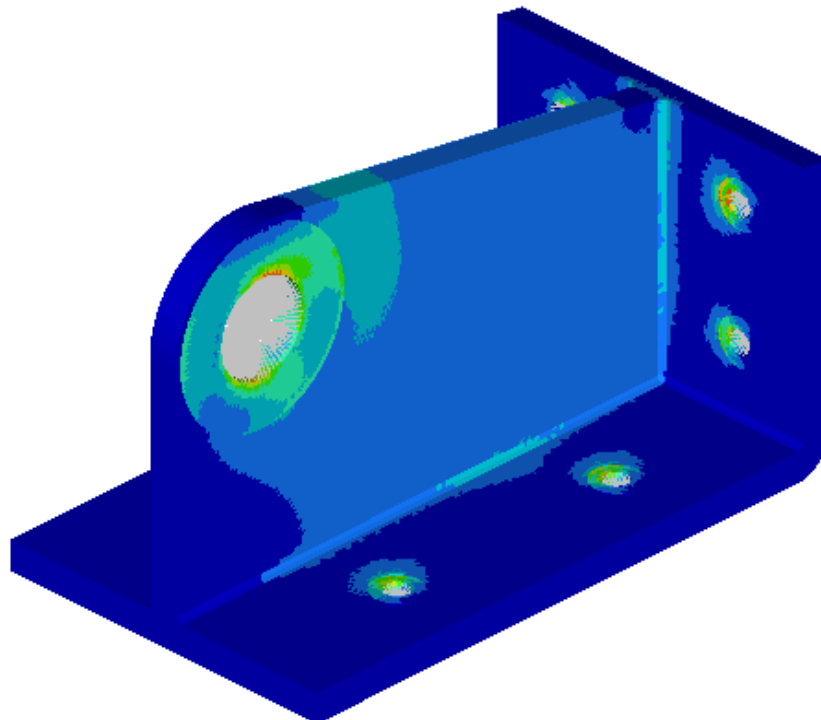
9.174E+01
8.154E+01
7.135E+01
6.116E+01
5.097E+01
4.078E+01
3.059E+01
2.040E+01
1.021E+01
1.729E-02
No result
Max = 9.174E+01
3D 77695
Min = 1.729E-02
3D 94151



Tamanho do elemento: 0,8 mm

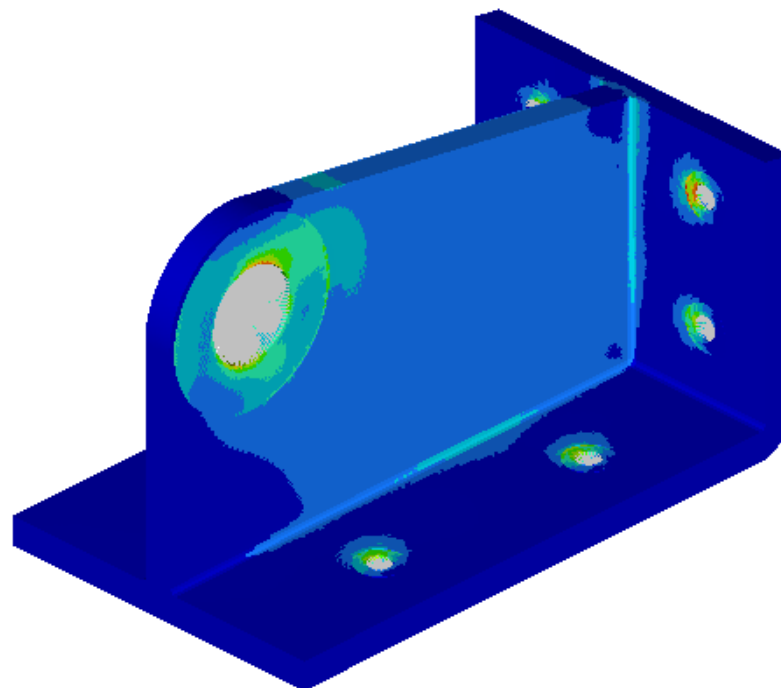
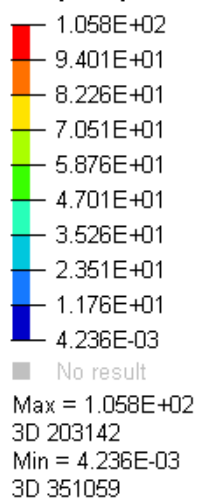
Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

1.001E+02
8.899E+01
7.786E+01
6.674E+01
5.562E+01
4.450E+01
3.337E+01
2.225E+01
1.113E+01
7.557E-03
No result
Max = 1.001E+02
3D 529536
Min = 7.557E-03
3D 162514



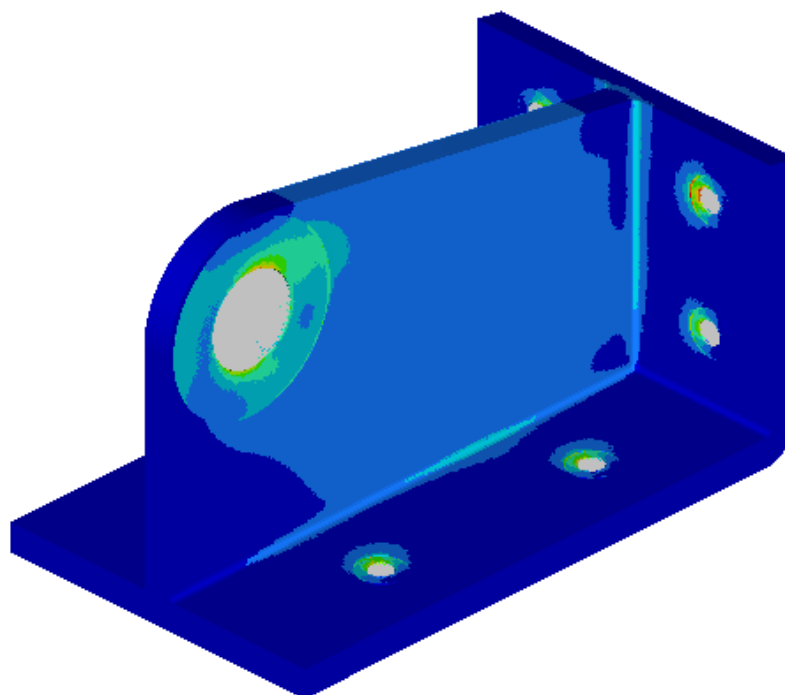
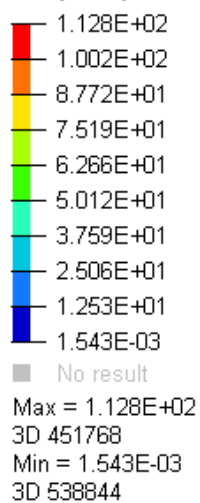
Tamanho do elemento: 0,6 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system



Tamanho do elemento: 0,4 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system



ANEXO E

ITERAÇÕES DE CONVERGÊNCIA MALHA CASO 2

Convergência de malha caso de estudo 2

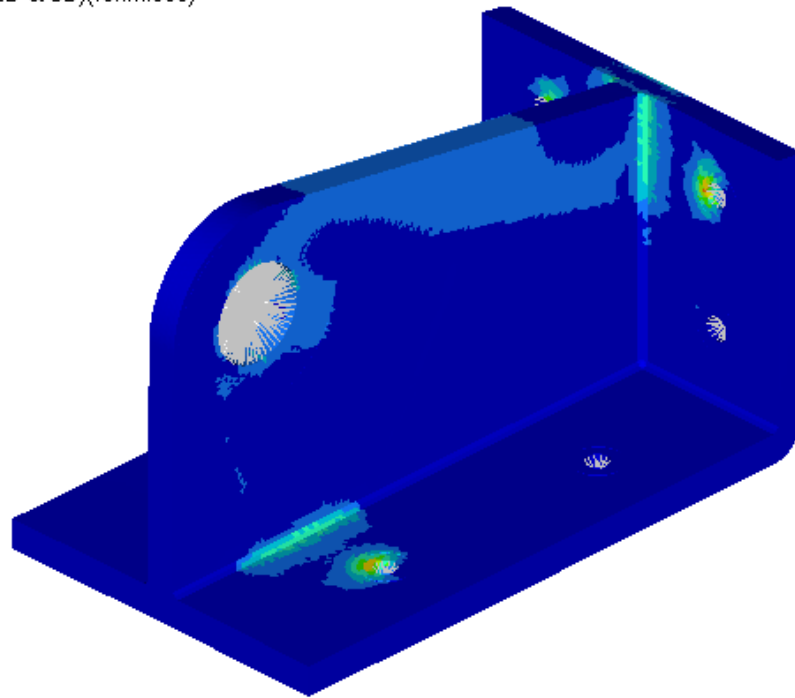
Tamanho do elemento: 1 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

4.168E+02
3.705E+02
3.241E+02
2.778E+02
2.315E+02
1.852E+02
1.389E+02
9.261E+01
4.631E+01
1.415E-05

■ No result

Max = 4.168E+02
3D 344026
Min = 1.415E-05
3D 272940



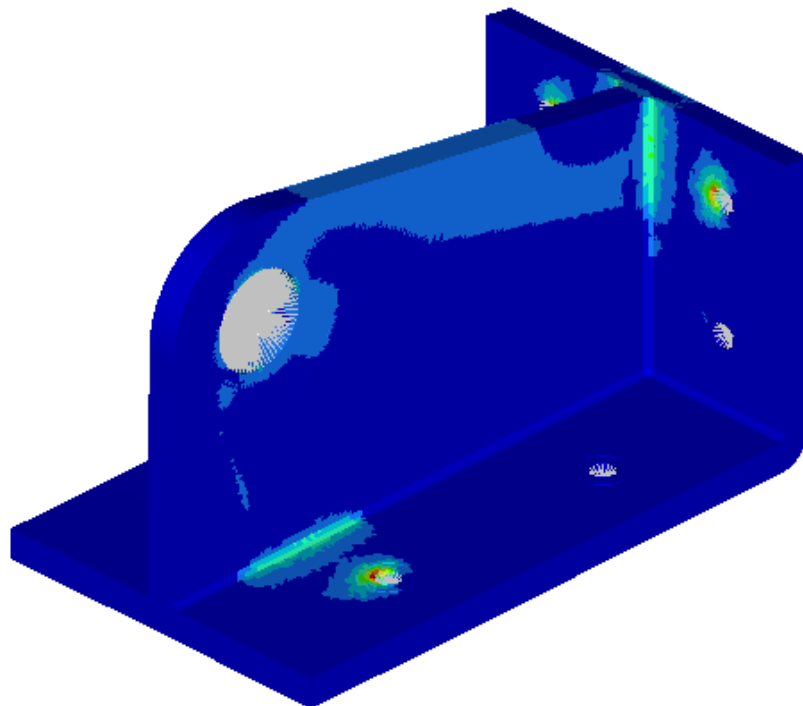
Tamanho do elemento: 0,8 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

4.159E+02
3.697E+02
3.235E+02
2.772E+02
2.310E+02
1.848E+02
1.386E+02
9.242E+01
4.621E+01
1.095E-05

■ No result

Max = 4.159E+02
3D 534514
Min = 1.095E-05
3D 185504



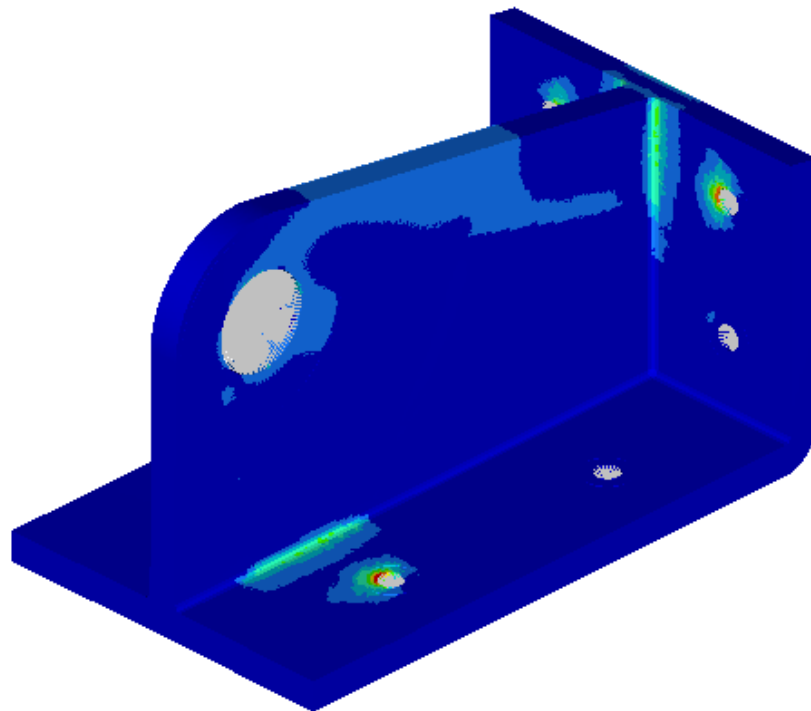
Tamanho do elemento: 0,6 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

4.412E+02
3.922E+02
3.431E+02
2.941E+02
2.451E+02
1.961E+02
1.471E+02
9.804E+01
4.902E+01
9.945E-06

■ No result

Max = 4.412E+02
3D 977001
Min = 9.945E-06
3D 351059



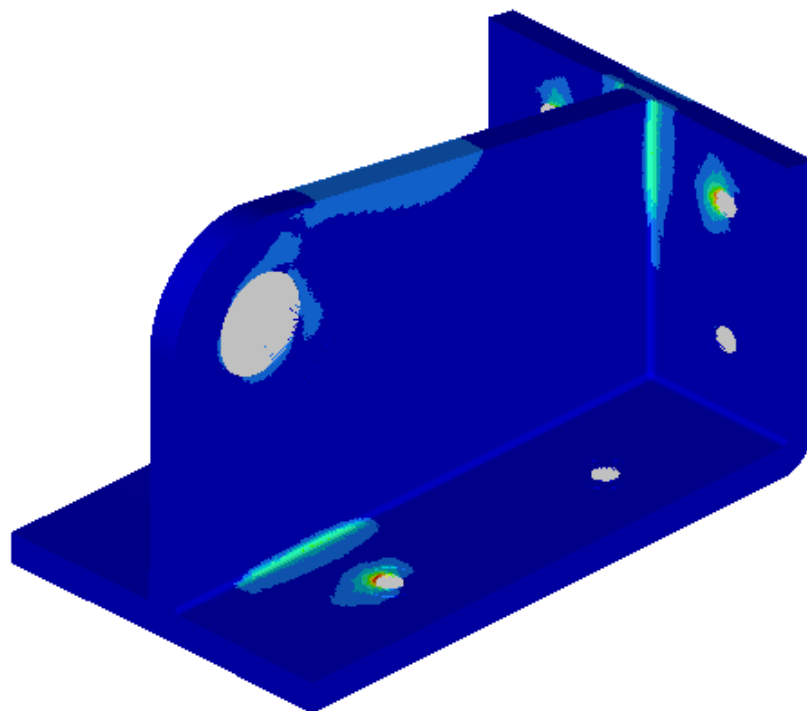
Tamanho do elemento: 0,4 mm

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

5.170E+02
4.596E+02
4.021E+02
3.447E+02
2.872E+02
2.298E+02
1.723E+02
1.149E+02
5.745E+01
5.128E-06

■ No result

Max = 5.170E+02
3D 2462476
Min = 5.128E-06
3D 538844



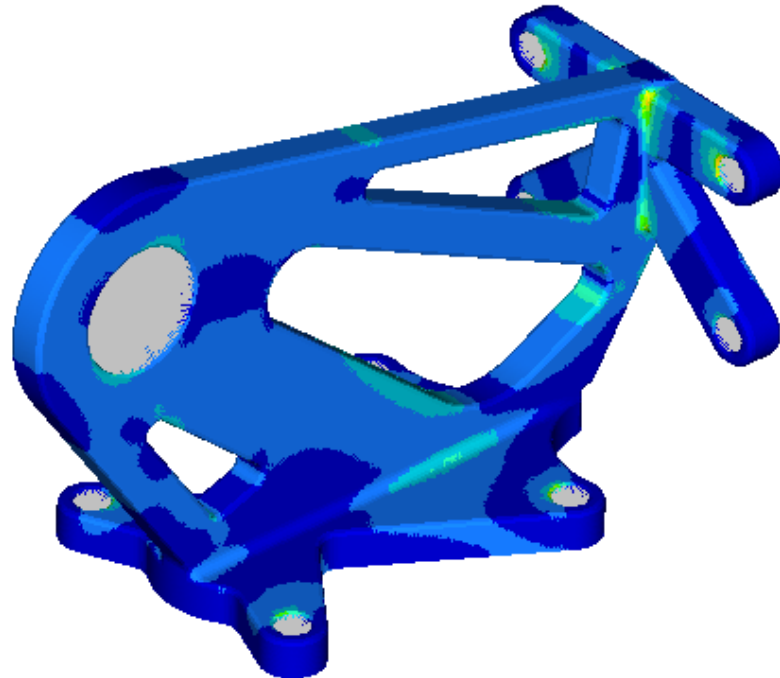
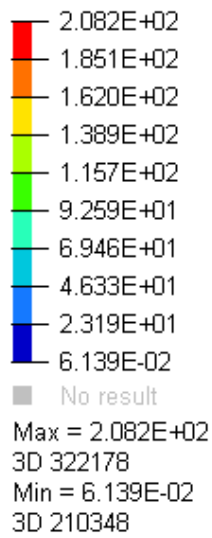
ANEXO F

RESULTADOS DAS ANÁLISES AOS COMPONENTES A, B E C

Resultados da análise componente A

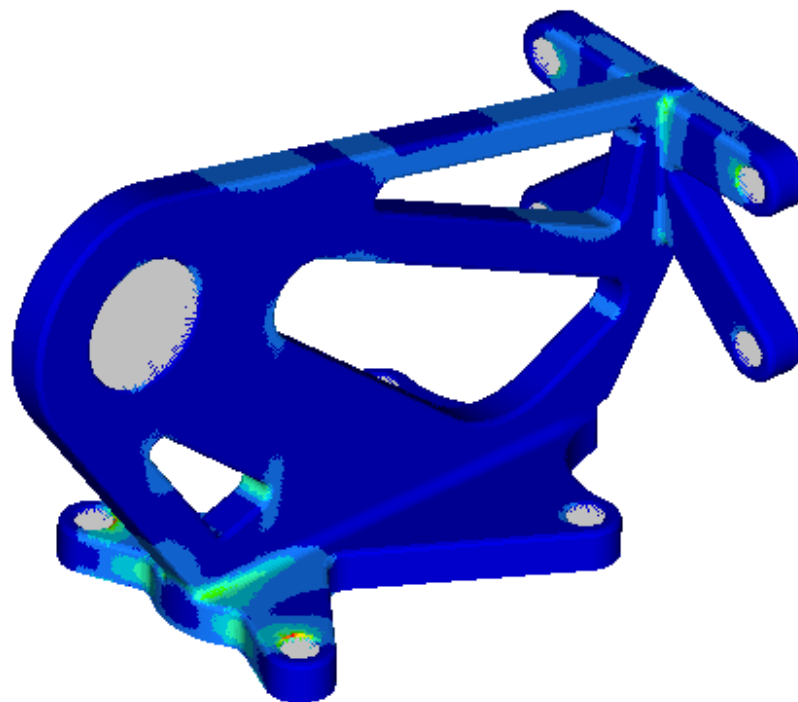
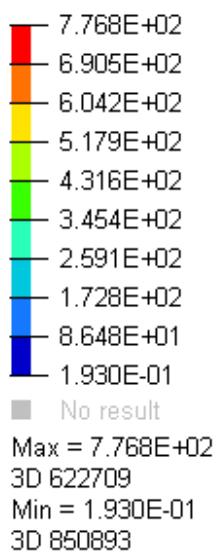
Caso de Estudo 1

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system



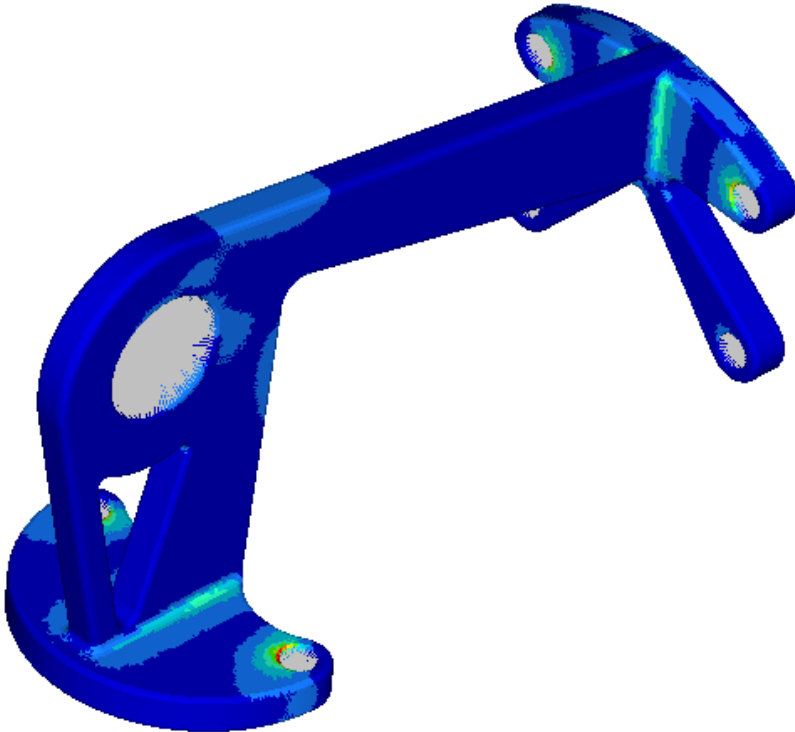
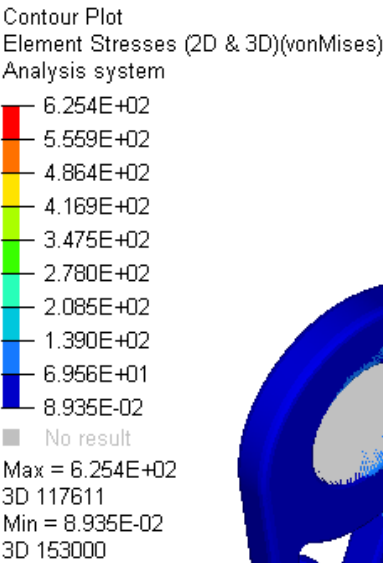
Caso de Estudo 2

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

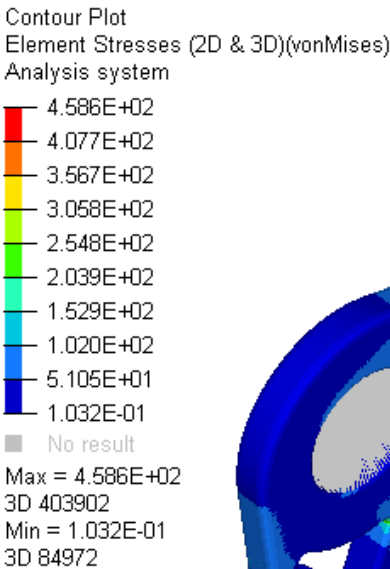


Resultados da análise componente B

Caso de Estudo 1

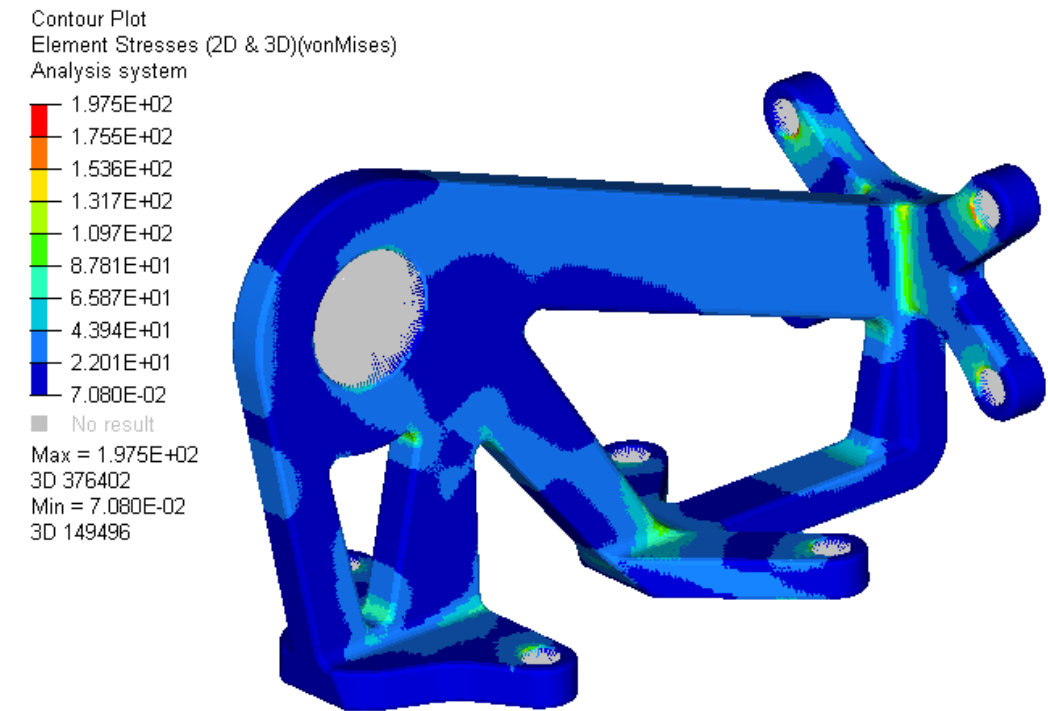


Caso de Estudo 2

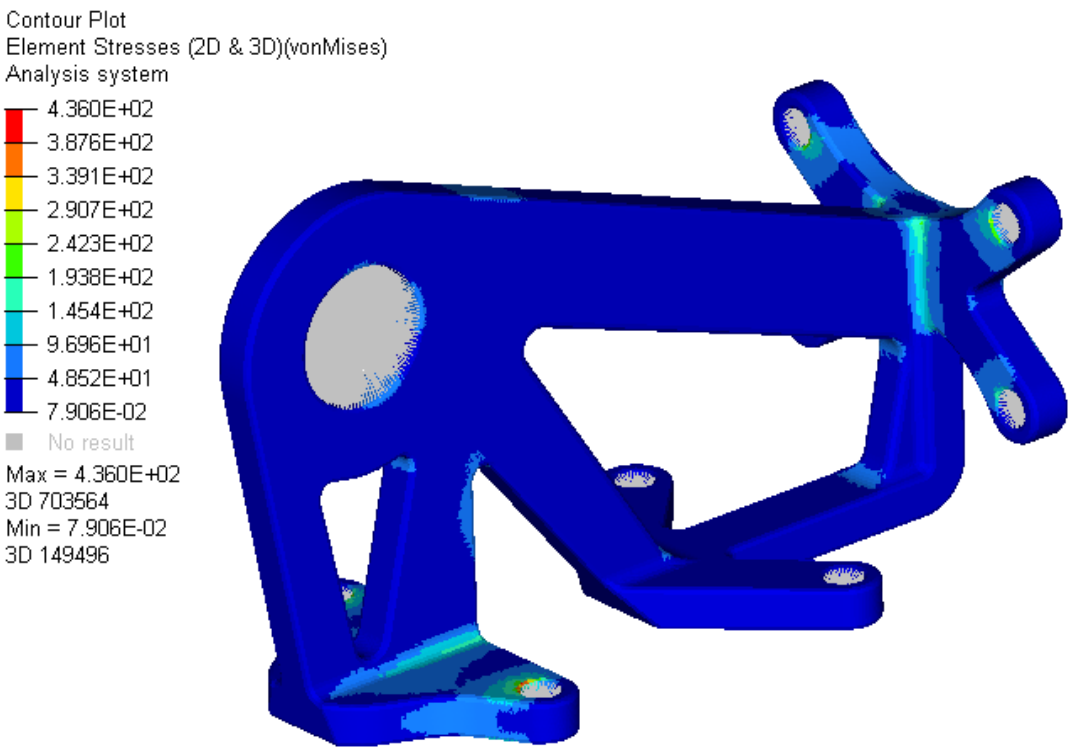


Resultados da análise componente C (Al)

Caso de Estudo 1



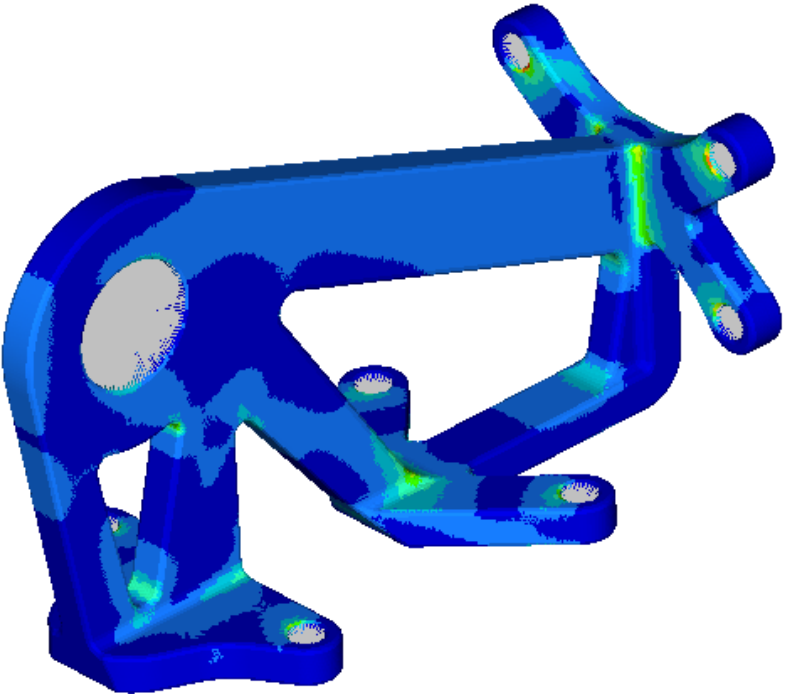
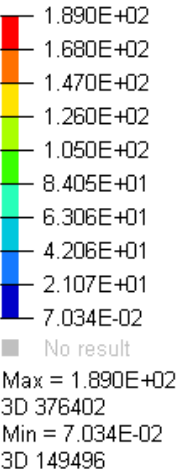
Caso de Estudo 2



Resultados da análise componente C (Aço)

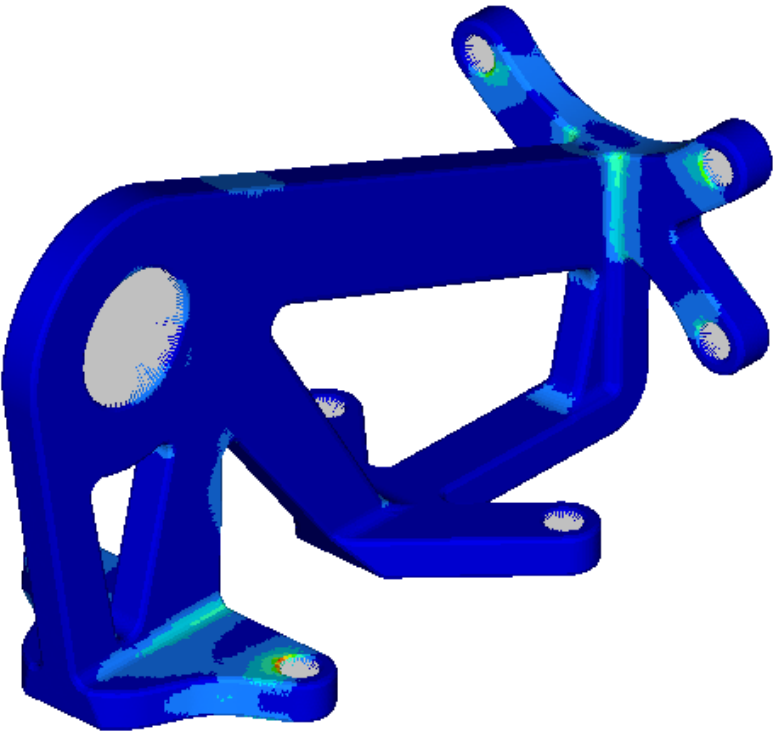
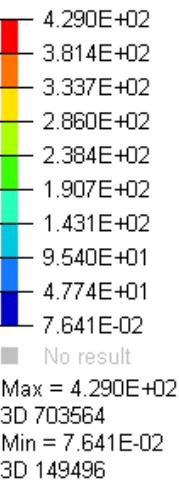
Caso de Estudo 1

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system



Caso de Estudo 2

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

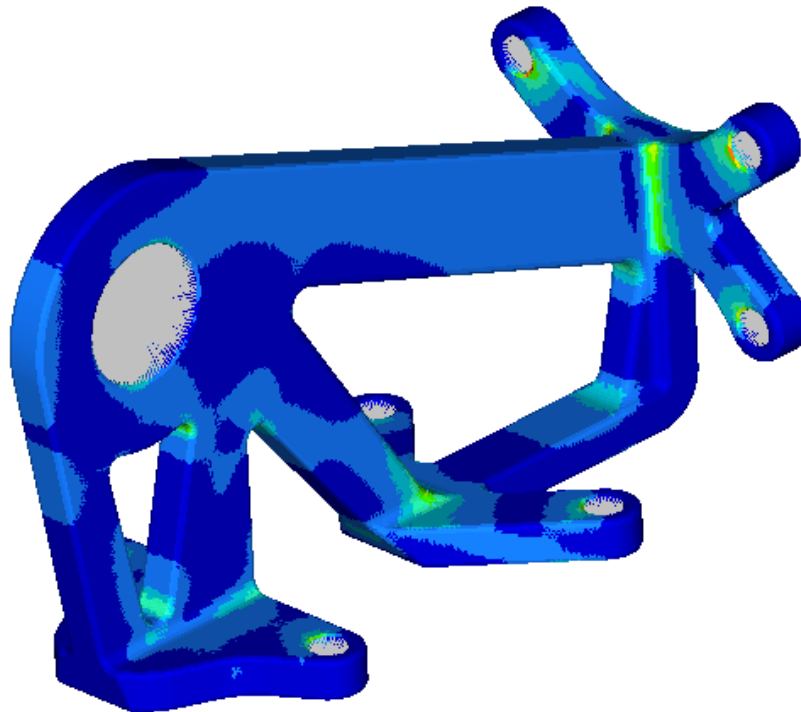


Resultados da análise componente C (Ti)

Caso de Estudo 1

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

1.913E+02
1.700E+02
1.488E+02
1.275E+02
1.063E+02
8.505E+01
6.380E+01
4.256E+01
2.131E+01
7.025E-02
■ No result
Max = 1.913E+02
3D 376402
Min = 7.025E-02
3D 149496



Caso de Estudo 2

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Analysis system

4.310E+02
3.831E+02
3.352E+02
2.873E+02
2.395E+02
1.916E+02
1.437E+02
9.583E+01
4.795E+01
7.673E-02
■ No result
Max = 4.310E+02
3D 703564
Min = 7.673E-02
3D 149496

